НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Хіміко-технологічний факультет
Кафедра технології електрохімічних виробництв

«На правах рукопису»
УДК 621.357

До захисту допущено:
В.о. завідувача кафедри
_____ ___Олексій КОСОГІН

«____» грудня 2024р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра
за освітньою програмою «Хімічні технології неорганічних, електродних матеріалів та водоочищення»
зі спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія»
на тему: «Корозія алюмінієвих сплавів в контакті з вуглепластиковим композитом»

Виконав: студент II курсу, групи ХЕ-31мп
Калюжний Андрій Сергійович _____
Керівник:
Білоусова Ніна Аркадіївна, к.т.н., ст. викладач _____

Рецензент:
Косогіна Ірина Володимирівна,
к.т.н., заступник завідувача кафедри ТНР, В та ЗХТ; доцент _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2024 рік

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Хіміко-технологічний факультет
Кафедра технології електрохімічних виробництв

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньою програмою.
Спеціальність – 161 Хімічні технології та інженерія
Освітня програма «Хімічні технології неорганічних, електродних матеріалів та водоочищення»

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача кафедри
_____ Олексій КОСОГІН
«_____»_____2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Калюжному Андрію Сергійовичу

1. Тема дисертації «Корозія алюмінієвих сплавів в контакті з вуглепластиковим композитом», науковий керівник дисертації Білоусова Ніна Аркадіївна затверджені наказом по університету від 08.11. 2024р. №5022-с
2.Термін подання студентом дисертації 11.12.2024р.
3. Об’єкт дослідження: контактна корозія алюмінієвих сплавів з вуглепластиковим композитом.
4. Вихідні дані: зарубіжні та вітчизняні монографії, наукові періодичні видання, а також матеріали, отримані з практичної діяльності.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: дослідити корозійну стійкість основних алюмінієвих сплавів у різних середовищах, оцінити вплив захисної оксидної плівки на корозію Д16 в агресивних середовищах, визначити контактну корозію анодованого Д16 з вуглепластиком.
6. Орієнтовний перелік графічного(ілюстративного) матеріалу: презентація магістерської дисертації.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Експериментальна частина	Білоусова Н.А., ст. викл., к.т.н.		
Розробка стартап-проєкту	Білоусова Н.А., ст. викл., к.т.н.		

9. Дата видачі завдання03 вересня 2024 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літературних джерел, збір необхідних даних	01.10.2024 – 20.10.2024	
2	Експериментальні дослідження	16.10.2024 – 22.11.2024	
3	Аналіз та оформлення експериментальних даних	16.11.2024 – 03.12.2024	
4	Написання літературного огляду	23.10.2024 – 07.11.2024	
5	Написання розділу стартап-проєкт	19.11.2024 – 02.12.2024	
6	Оформлення магістерської дисертації	28.11.2024 – 10.12.2024	
7	Подача дисертації на перевірку на схожість	11.12.2024	

Студент АндрійКАЛЮЖНИЙ

Науковий керівникНінаБІЛОУСОВА

РЕФЕРАТ

«Корозія алюмінієвих сплавів в контакті з вуглепластиковим композитом»

Калюжний А.С. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ХТФ, гр. ХЕ-31мп

Магістерська дисертація, 2024 рік, кількість сторінок – 79, таблиць – 17, рисунків – 17, літературних джерел – 30.

Магістерська робота присвячена актуальному питаннюкорозійної стійкості алюмінієвих сплавів при їх контакті з вуглепластиковими композитами в умовах вологої корозії.

Метою роботи є дослідженняпротикорозійної стійкості алюмінієвих сплавів АД1 та Д16, які використовуються в авіабудуванні, в агресивних середовищах, які рекомендовані настановами стандартами. Задачами дослідження було встановлення кількісних характеристик корозії методом поляризаційного опору та контактної корозії методом масометрії.

Об'єкт дослідження: корозія алюмінієвих сплавів;

Предмет дослідження: загальна та гальванічна контактна корозія анодованого сплаву Д16.

Проведено дослідження впливу виготовлення матеріалу на його корозійну стійкістьв різних агресивних середовищах електрохімічним експресним методом поляризаційного опору. Досліджено взаємодію оксидного покриття алюмінієвого сплавуз вуглепластиковим композитом та оцінено показники контактної корозії в залежності від тривалості випробувань та вплив на довговічність і експлуатаційні характеристики матеріалів.

Показано, що анодоване покриття значно знижує швидкість корозії, навіть за умов підвищеної агресивності середовищ. Встановлено, що контактна корозія є критичним фактором, який суттєво впливає на експлуатаційні властивості конструкцій, виготовлених з алюмінієвих сплавів та вуглепластикових композитів.

Результати дослідження підтверджують ефективність антикорозійних технологій і дозволяють рекомендувати оптимальні матеріали та методи їхньої обробки для авіабудування, зокрема для збільшення довговічності та надійності техніки.

Отримані дані можуть бути використані для розробки нових технологій з підвищенням стійкості до корозії та зниженням ризику руйнування за рахунок контактної корозії у конструкційних матеріалах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА:АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ, КОНТАКТНА КОРОЗІЯ, АНОДНА ПЛІВКИ, ВУГЛЕПЛАСТИКОВИЙ КОМПОЗИТ, ГАЛЬВАНІЧНА КОРОЗІЯ, ШВИДКІСТЬ КОРОЗІЇ, ПОЛЯРИЗАЦІЙНИЙ ОПІР.

Abstract

“Corrosion of aluminum alloys in contact with carbon fiber composite”

Kaliuzhnyi A.S. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Chemical Technology Faculty, Group CHE-31mp

Master's Thesis, 2024, number of pages – 79, tables – 17, figures – 17, references – 30.

A comprehensive study of the corrosion resistance of aluminum alloys in contact with carbon fiber composites has been conducted. The research addresses the effects of various aggressive environments, including solutions containing chlorides and other corrosive-active components, on galvanic corrosion. The interaction mechanisms between oxide coatings on aluminum alloys and carbon fiber composites were examined, along with their influence on the durability and performance characteristics of the materials.

It was demonstrated that anodized coatings significantly reduce the corrosion rate, even under highly aggressive conditions. The role of protective oxide films in preventing alloy degradation was evaluated. It was established that contact corrosion is a critical factor significantly affecting the mechanical strength and operational properties of structures made of aluminum alloys and carbon fiber composites.

The findings confirm the effectiveness of anti-corrosion technologies and enable the recommendation of optimal materials and processing methods for the aerospace industry, particularly to enhance the longevity and reliability of equipment.

The obtained data can be applied to develop new technologies aimed at improving corrosion resistance and mitigating the risk of structural failure caused by contact corrosion in construction materials.

KEYWORDS: aluminum alloys, contact corrosion, anodized films, carbon fiber composites, galvanic corrosion, protective coatings, corrosion rate, polarization studies, economic analysis, operational properties.

Зміст

Вступ 12

1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД 14

1.1 Характеристика матеріалів, які використовуються в авіабудуванні 14

1.1.1 Алюмінієві сплави 14

1.1.2 Загальна характеристика корозійного руйнування алюмінієвих сплавів (загальна, пітинг, міжкристалітна) 16

1.2 Вуглецеві композитні матеріали 18

1.3 Корозія вуглецевих композитів 24

1.4 Гальванічні датчики для оцінки корозійних процесів 28

1.5 Розчини для дослідження корозії алюмінію, рекомендовані стандартами 31

1.6 Методи дослідження корозії вуглецевих матеріалів та композитів 32

1.7 Огляд наукових статей з дослідження контактної гальванічної корозії алюмінієвих сплавів та композитних матеріалів 34

2. МЕТОДИКА ПІДГОТОВКА МЕТАЛЕВИХ ТА КОМПОЗИТНИХ ЗРАЗКІВ. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ КОРОЗІЇ МЕТОДАМИ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ОПОРУ ТА ГРАВІМЕТРІЇ 37

2.1 Матеріали і реактиви 37

2.2 Попередня обробка композитних електродів з вуглепластику 38

2.3 Обробка зразків з алюмінієвих сплавів 39

2.4 Вимірювання швидкості корозії методом поляризаційного опору 39

2.5 Вимірювання швидкості контактної корозії гравіметричним методом 41

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ 43

3.1 Дослідження швидкості корозії методом поляризаційного опору на зразках у формі прутків без захисного покриття. 43

3.2 Дослідження швидкості корозії методом поляризаційного опору на зразках у формі «прапорців» з захисним покриттям в вигляді анодної плівки 48

3.3 Дослідження контактної корозії алюмінію з вуглеволоконним композитом гравіметричним методом. 52

4.СТАРТАППРОЄКТ(ЕКОНОМІЧНАЧАСТИНА) 56

4.1Резюместартап-проєкту 56

4.2Аналіз зовнішнього та внутрішнього середовища стартапу 61

4.3 Оцінкаринковихпозиційінноваційноїрозробки 68

ВИСНОВКИ 74

Список літератури 778

Вступ

Сучасний розвиток техніки вимагає створення нових матеріалів, здатних надійно функціонувати в складних умовах поєднання силових, температурних полів, агресивних середовищ, випромінювання, вакууму та високих тисків. Часто ці вимоги до матеріалів є суперечливими. Наприклад, високоміцні сплави зазвичай мають низьку пластичність, підвищену чутливість до напружень і відносно слабку стійкість до утворення тріщин. Хоча традиційні методи металознавства, такі як легування та термомеханічна обробка, дозволяють значно підвищити міцність металів і сплавів, вони не можуть суттєво змінити модуль пружності.

Для матеріалів, які працюють у складних умовах, важливими показниками є питома міцність, питома жорсткість та коефіцієнт інтенсивності напружень. Композитні матеріали (КМ) значно перевершують традиційні сплави за цими показниками, оскільки дозволяють досягти унікального поєднання високої питомої міцності, твердості, жароміцності, зносостійкості та інших властивостей, що недоступні звичайним матеріалам. Це відкриває можливості для створення нових конструкцій, зокрема для авіації та космонавтики. Завдяки використанню КМ можна збільшити потужність двигунів, зменшити масу техніки та підвищити ефективність транспортних засобів.

Наприклад, у конструкції літака АН-225 «Мрія» використання КМ дозволило замінити 16 тон металевих сплавів, що підвищило його вантажопідйомність, дальність польоту та економію пального. У новітніх літаках, таких як Airbus A350, частка композитних матеріалів досягає 53 %, а у майбутніх моделях ця частка може зрости до 70-75 %.

З іншого боку, для досягнення необхідних механічних властивостей композитні матеріали будуть мати інші об'ємні, ніж відповідна металева деталь, з такими ж характеристиками. Це наглядно показує літак Boeing 777-9, або 777X, в крилі якого використовуються композитні матеріали. Внаслідок його

вдосконалення, він став легшим, проте розмах його крила збільшився і він вже не підпадав під вимоги невеликих аеропортів, під які підходила ця ж сама модель з металевим крилом. В результаті чого, довелось створювати механізм, який би складав кінці крила, як показано на рис.1, щоб літак між знаходитись в ангарах невеликих аеропортів.

Рисунок 1 – Механізм складання крила

Звідси випливає, що використання композитних матеріалів не дає можливості повністю відмовитись від використання металів та їх сплавів. Найбільш широко в авіабудуванні поширені різновиди конструкційної сталі, алюміній та його сплави, а також сплави титану, в місцях де необхідно досягти максимуму допустимих механічних навантажень при дуже обмеженій масі самих деталей.

Головною проблемою при використанні композитів разом з металами та їх сплавами є контактна корозія в конденсаті, оскільки стандартний електродний потенціал вуглецевих композитів позитивніший за стандартний електродний потенціал сталі або алюмінію. Наразі з нею боряться використанням великих об'ємів герметиків та інертних прокладок між металевою та вуглеволоконною деталлю.

Тому темою магістерської дисертаційної роботи є дослідження і порівняння корозійної стійкості алюмінієвих сплавів та контактна корозія з алюмінієвого сплаву з композитним вуглецевим волокном.

1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Характеристика матеріалів, які використовуються в авіабудуванні

1.1.1 Алюмінієві сплави

Алюмінієві сплави відіграють важливу роль в авіаційній промисловості завдяки своїм винятковим властивостям — легкості, міцності, корозійній стійкості та оброблюваності. Серед них особливої уваги заслуговують сплави Д16Т та АД1, які, незважаючи на спільну основу, мають суттєві відмінності в механічних характеристиках і сферах застосування.

Д16Т — це високоміцний сплав, який добре піддається деформації, що містить значну частку міді (приблизно 4%) разом з додатковими легуючими елементами, такими як магній (1,2-1,6%), марганець (0,3-0,9%) і кремній (до 0,5%). Спершу в спеціальних індукційних або електричних печах сировина (високочистий алюміній) розплавляється при температурі близько 700–800 °C. Важливо контролювати температуру, щоб уникнути окислення легуючих елементів. Для цього в процесі плавлення застосовуються інертні гази або покриття, які перешкоджають контакту металу з атмосферою. При досягненні необхідної температури в розплавлений алюміній додаються легуючі елементи. Процес легування є критичним, оскільки правильне співвідношення компонентів визначає механічні властивості сплаву. Після додавання компонентів сплав ретельно перемішуються для досягнення однорідності складу. При отриманні однорідної структури сплав Д16Т заливається у форми для отримання заготовок. Це може бути як постійне, так і лиття в піщані форми, залежно від потреби в кількості деталей та складності форми заливок. Використання постійних форм дозволяє досягти більшої точності та зменшити відходи. Після заливки у форми важливо забезпечити контрольоване охолодження. Швидке охолодження допомагає зберегти механічні властивості сплаву, зокрема підвищує міцність завдяки створенню дрібнозернистої структури. Охолодження може бути здійснене

за допомогою води або повітря, залежно від форми та обсягу виробу. Остаточним етапом є термічна обробка, яка складається з двох основних процесів: загартування та старіння. Загартування проводиться шляхом швидкого охолодження заливок, що призводить до створення метастабільної структури. Після цього матеріал піддається старінню при підвищених температурах (до 200 °C) протягом кількох годин. Цей процес дозволяє досягти підвищених механічних властивостей, таких як міцність та твердість, що робить сплав Д16Т ідеальним для використання в конструкціях, що зазнають великих навантажень.

АД1 — це алюмінієвий сплав з незначним вмістом домішок, насамперед призначений для підвищення пластичності та корозійної стійкості. На відміну від Д16Т, АД1 є майже чистим алюмінієм з незначною кількістю кремнію (до 0,2%) і заліза (до 0,7%), що знижує його механічні характеристики порівняно з високоміцними сплавами. Проте завдяки низькій щільності та високій пластичності цей сплав легко обробляється і добре піддається зварюванню, що розширює його можливості в різних областях авіабудування.

Процес виготовлення деталей з даного сплаву є досить схожим на попередньо описаний для Д16Т, проте є певні відмінності. В плавильних печах алюміній розплавляється при температурі близько 660 °C. З метою покращення якості металу в плавлення обов'язково проходить в атмосфері інертних газів, таких як аргон. На етапі легування в розплавлений алюміній додаються легуючі компоненти які забезпечують необхідні механічні характеристики, такі як підвищена пластичність і стійкість до корозії. Після досягнення необхідного складу та однорідності розплавленого металу, сплав АД1 заливається у спеціальні постійні або піщані форми для отримання заготовок. Охолодження литих заготовок є важливим етапом. Сплав АД1 зазвичай охолоджується в умовах, що дозволяють зберегти його пластичність та уникнути утворення тріщин. Охолодження зазвичай відбувається природно або з використанням водяного охолодження, що дозволяє контролювати швидкість охолодження і, відповідно, структуру матеріалу. Кінцевій термічній обробці сплав АД1 зазвичай не піддається на відміну від сплавів, що відрізняються високою міцністю, проте його

все ж можуть обробляти для покращення механічних характеристик. Для цього застосовують процеси, які сприяють вирівнюванню внутрішньої структури та покращенню механічних властивостей. Наприклад, сплав може піддаватися невеликій термічній обробці для збільшення пластичності або поліпшення корозійної стійкості [1,2].

1.1.2 Загальна характеристика корозійного руйнування алюмінієвих сплавів (загальна, пітинг, міжкристалітна)

Корозія алюмінієвих сплавів є складним та багатоаспектним процесом, що включає як фізико-хімічні реакції, так і механічні фактори, що впливають на довговічність та працездатність матеріалів. Вона є результатом електрохімічних процесів, у яких метал вступає в реакцію з навколишнім середовищем, що призводить до втрати маси матеріалу та змін у його властивостях. У випадку алюмінієвих сплавів, корозія зазвичай проявляється як загальна, пітингова та міжкристалітна.

Загальна корозія виникає, коли метал зазнає рівномірного руйнування на всій своїй поверхні внаслідок тривалої взаємодії з агресивними агентами, такими як кислоти, луги або солі. Однією з основних характеристик загальної корозії є здатність алюмінію формувати стабільну оксидну плівку (Al_2O_3) на своїй поверхні, що зазвичай забезпечує його корозійну стійкість в нейтральних середовищах. Оксидна плівка в товщину в середньому від 2…5 до 18…20 мікрометрів, але вона відіграє вирішальну роль у захисті металу від подальшого корозійного руйнування. Її структура і стабільність значною мірою залежать від складу середовища, зокрема його pH і наявності агресивних іонів, таких як хлориди або сульфати.

У кислих або лужних середовищах оксидна плівка може розчинятися, що створює умови для електрохімічних процесів, при яких алюміній окислюється, утворюючи іони Al^{3+}, що переходять у розчин, а на катодній частині утворюються гідроксид-іони. Цей процес прискорюється при підвищенні температури, оскільки

зростання температури збільшує швидкість хімічних реакцій, зокрема руйнування захисної плівки. Також механічні пошкодження плівки, такі як подряпини, можуть значно прискорити процес корозії, оскільки на цих місцях утворюються мікрогальванічні елементи, що сприяють локалізації корозійних реакцій.

Особливе значення має вибір сплаву для конкретних умов експлуатації, оскільки вміст легуючих елементів, таких як мідь, магній та кремній, значно впливає на корозійну стійкість матеріалу. Наприклад, у сплавах, багатих на мідь, зазвичай спостерігається підвищена корозійна активність, оскільки мідь утворює гальванічні пари з алюмінієм, що сприяє локалізації корозійних реакцій. Вміст магнію, з іншого боку, може призвести до виникнення пітингової корозії, оскільки магній є більш електрохімічно активним і підвищує схильність матеріалу до утворення точкових пошкоджень на поверхні.

Пітингова корозія є одним із найбільш підступних видів корозії, оскільки вона може прогресувати без явних ознак на поверхні металу, що робить її важкою для виявлення без спеціальних методів діагностики. Пітинг утворюються, коли оксидна плівка руйнується на певних ділянках металу, часто під дією хлорид-іонів, що присутні в морській воді, а також у промислових атмосферах з підвищеною концентрацією кислотних газів. У цих ділянках створюється середовище для подальшого електрохімічного процесу, при якому анодна частина реакції спричиняє розчинення алюмінію, а катодна — утворення гідроксиду або іншої продукту, що посилює корозійні процеси.

Оскільки пітингова корозія може прогресувати швидко та привести до значного пошкодження металу, важливо проводити регулярні огляди та використовувати методи, що дозволяють виявити навіть найменші дефекти. До таких методів відносяться електрохімічні вимірювання потенціалу, ультразвукові та рентгенографічні методи, а також аналіз поверхні за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Для запобігання пітинговій корозії необхідно застосовувати спеціальні захисні покриття, такі як анодування, що створює додатковий бар’єр між металом і агресивним середовищем, або використання покриттів на основі полімерів, які можуть значно зменшити вплив хлорид-іонів.

Міжкристалітна корозія, яка є особливо небезпечною для алюмінієвих сплавів, виникає на межах зерен внаслідок відмінностей у хімічному складі, що утворюються під час термічної обробки або лиття. Міжкристалітна корозія проявляється в руйнуванні саме на межі зерен, що значно знижує механічну міцність матеріалу, а отже, і його здатність витримувати навантаження. Цей тип корозії може призвести до формування тріщин, які з часом розширюються, особливо в умовах циклічних навантажень, що характерно для конструкцій в авіації та космонавтиці. Міжкристалітна корозія є особливо небезпечною на несучих конструкційних деталях, оскільки часто залишається непоміченою до тих пір, поки не призведе до катастрофічних руйнувань конструкцій. Механізм її розвитку включає утворення електрохімічно активних фаз на межах зерен, таких як інтерметалічні сполуки, що мають нижчу корозійну стійкість, що призводить до швидкого та неконтрольованого руйнування агресивними середовищами.

Діагностика міжкристалітної корозії зазвичай проводиться за допомогою мікроструктурних досліджень, таких як оптична та електронна мікроскопія, а також спеціальних корозійних тестів, що дозволяють оцінити її інтенсивність і поширення. Для попередження міжкристалітної корозії важливим є контроль за складу сплаву, зокрема зменшення вмісту таких елементів, як мідь, магній і залізо, що сприяють утворенню міжкристалітних фаза, а також коректне проведення термічної обробки. Використання спеціальних легуючих елементів, таких як хром, марганець або титан, може значно підвищити стійкість сплаву до міжкристалітної корозії.

1.2 Вуглецеві композитні матеріали

Композиційні матеріали (композити) є багатокомпонентними системами, що складаються з пластичної основи, або матриці, яка армована наповнювачами із високою міцністю, жорсткістю та іншими корисними властивостями. Унікальність таких матеріалів полягає в тому, що поєднання різнорідних компонентів дозволяє створювати матеріали, які мають властивості, що значно перевищують

характеристики кожної зі складових окремо. Варіюючи склад матриці, тип наповнювача, їх співвідношення, орієнтацію волокон та інші параметри, можливо досягти широкого спектру механічних, фізичних і хімічних властивостей, які відповідають конкретним вимогам.

Значною перевагою композитів є їхня здатність перевершувати традиційні матеріали та сплави за такими параметрами, як механічна міцність, жорсткість і корозійна стійкість, зберігаючи при цьому меншу масу. Ця властивість особливо цінна у галузях, де критично важливі оптимізація ваги та довговічність конструкцій, наприклад, у авіабудуванні, автомобілебудуванні чи суднобудуванні. Використання композитів дозволяє зменшувати масу конструкцій, підвищувати їхню корозійну стійкість і одночасно зберігати або навіть покращувати механічні характеристики.

Основні компоненти композитів – це матриця і наповнювач. Матриця виконує роль основи, яка забезпечує монолітність матеріалу, розподіл механічних напружень та захист від корозії. Наповнювач, своєю чергою, визначає основні механічні властивості композиту, зокрема міцність, жорсткість і здатність до деформації. Важливим є те, що навіть незначний вміст наповнювача здатний суттєво змінити характеристики матеріалу. Крім того, завдяки армуванню волокнами, композити набувають анізотропних властивостей, тобто їхні характеристики відрізняються у різних напрямках. Додавання певних типів волокон, таких як електропровідні, дозволяє надавати матеріалу додаткові функціональні властивості, наприклад, електропровідність у визначених напрямках.

Композиційні матеріали також характеризуються різноманітністю структури. Вони можуть бути волокнистими, шаруватими, дисперснопідсиленими, нанокомпозитами або зміцненими частинками. Вибір структури та типу наповнювача дозволяє створювати матеріали з необхідними властивостями для конкретного застосування. У цілому, композити є незамінними для створення інноваційних рішень у багатьох галузях, де необхідна комбінація легкості, міцності та стійкості до агресивних середовищ.

Композиційні матеріали мають багатогранну структуру та класифікацію, що визначаються взаємодією матриці й наповнювача. У шаруватих композитах компоненти розташовуються шарами, як, наприклад, у склі, армованому полімерними плівками (триплекс), яке використовується в автомобільній промисловості. У більшості інших класів композитів матрицю заповнюють частинками армуючої речовини. Ці класи розрізняються розмірами частинок: у композитах, зміцнених частинками, розмір перевищує 1 мкм, а їх вміст становить 20–25% за об'ємом; у дисперснопідсилених композитах частинки менші (0,01–0,1 мкм) і складають 1–15% за об'ємом. У нанокомпозитах, які належать до нового класу матеріалів, розмір частинок варіюється в межах 10–100 нм, що забезпечує унікальні властивості.

Особливу увагу серед композиційних матеріалів привертають полімерні композиційні матеріали (ПКМ), де матрицею є полімери. ПКМ – один із найчисленніших видів композитів, які активно використовуються в багатьох галузях промисловості завдяки їхнім перевагам. Вони поєднують високу корозійну стійкість із низькою масою, що дає змогу значно знижувати вагу конструкцій. Наприклад, у авіаційній і космічній промисловості використання ПКМ дозволяє зменшити вагу літальних апаратів на 5–30%. Це забезпечує суттєву економію, адже кожен кілограм зниження маси супутника на навколоземній орбіті заощаджує приблизно 20 000 доларів.

ПКМ знаходять застосування у численних галузях, таких як очистка води, хімічна, целюлозно-паперова, харчова та фармацевтична промисловості, а також енергетика. Основна продукція включає труби, резервуари, фітинги, скрубери, корпуси, панелі та інші вироби, які забезпечують тривалу експлуатацію в агресивних середовищах.

Серед полімерних композитів склопластики займають важливе місце. Ці матеріали, армовані скляними волокнами, характеризуються високою міцністю, низькою теплопровідністю, відмінними електроізоляційними властивостями та прозорістю для радіохвиль. Як матрицю використовують синтетичні смоли або термопластичні полімери. Застосування склопластиків почалося з Другої світової

війни для виготовлення антенних обтічників. Сучасні технології дозволяють довести вміст волокон у склопластику до 80% за масою, що суттєво підвищує механічні властивості. Склопластики широко застосовуються у будівництві, суднобудуванні, радіоелектроніці, а також для виготовлення спортивного інвентарю, віконних рам і побутових предметів.

Окрему категорію складають вуглепластики, наповнювачем у яких є вуглецеві волокна. Ці матеріали відрізняються високою міцністю та здатністю зберігати свої властивості в умовах дії агресивних середовищ. Завдяки своїм характеристикам вуглепластики знаходять широке застосування в авіаційній промисловості, енергетиці та інших високотехнологічних галузях.

Вуглецеві волокна отримують із синтетичних і природних матеріалів, таких як целюлоза, акрилонітрильні кополімери, нафтові та кам’яновугільні пеки. Процес їх виготовлення включає три основні етапи термічної обробки: окислення при 220°C, карбонізацію при 1000–1500°C і графітизацію при 1800–3000°C. У результаті утворюються волокна з високим вмістом вуглецю (до 99,5% за масою). Залежно від режимів термічної обробки та типу сировини структура отриманого волокна може змінюватися.

Вуглеволокна є ключовим компонентом для створення вуглепластиків, де вони комбінуються з матрицями на основі термореактивних або термопластичних полімерів, аналогічно склопластикам. Основні переваги вуглепластиків порівняно зі склопластиками включають нижчу щільність і вищий модуль пружності. Це робить вуглепластики надзвичайно легкими, міцними та стабільними за температурних коливань, адже вони мають практично нульовий коефіцієнт лінійного розширення. Ще однією важливою характеристикою є електропровідність усіх вуглепластиків, хоча їх чорний колір може дещо обмежувати галузі застосування.

Вуглепластики знаходять широке використання в авіації, ракетобудуванні, машинобудуванні, космічній техніці, а також у виробництві медичного обладнання, протезів, спортивного інвентарю та легких транспортних засобів, таких як велосипеди.

Застосування вуглецевих волокон також охоплює створення композиційних вуглеграфітових матеріалів, які є найбільш термостійкіми серед відомих композиційних матеріалів. Ці матеріали можуть працювати в інертних або відновних середовищах при температурах до 3000°C. Для їх виготовлення використовують два основних методи. У першому методі вуглеволокна просочують фенолформальдегідною смолою, яку потім піддають піролізу при високих температурах (до 2000°C). Цей процес може повторюватися кілька разів, щоб зменшити пористість і підвищити щільність матеріалу. Другий метод включає прожарювання звичайного графіту в атмосфері метану, де піроліз метану сприяє закриттю пор графіту дрібнодисперсним вуглецем, що збільшує його щільність у 1,5 раза порівняно з вихідним матеріалом.

Високотемпературна стійкість і механічна міцність вуглепластиків роблять їх незамінними у виробництві деталей для ракетної техніки, швидкісних літаків і космічних апаратів. Вони також використовуються для виготовлення гальмівних колодок і дисків для авіації та багаторазових космічних кораблів, а також електротермічного обладнання. Завдяки своїм властивостям, вуглепластики та матеріали на їх основі відкривають нові горизонти для інженерії в умовах екстремальних навантажень і температур.

Вуглецеві композитні матеріали, незалежно від типу, мають в своїй будові матрицю та армуючі волокна. Матриці, які використовуються у виробництві вуглеволоконних композитів, відіграють ключову роль не лише у забезпеченні міцності та монолітності структури, але й повинні володіти необхідною пластичністю і термостійкістю для ефективної роботи в межах температурного діапазону, для якого розроблено композитний матеріал (КМ). Вибір типу матриці є критично важливим і залежить від робочих умов, зокрема температурних і механічних навантажень, а також вимог до хімічної стійкості матеріалу[1].

Полімерні матриці застосовуються для композитів, що функціонують при відносно невисоких температурах (до 200 °C). До цієї категорії належать вуглепластики, в яких полімерна матриця, наприклад на основі епоксидних або поліефірних смол, поєднується з волокнами. Ці смоли, завдяки своїй здатності

утворювати тривимірні сітки через поперечні зв'язки, забезпечують високу адгезію до волокон і достатню термостійкість. Основні вимоги до полімерних матриць включають хімічну інертність, високу питому міцність і стабільність властивостей в умовах експлуатації.

Металеві матриці застосовуються у випадках, коли необхідно забезпечити роботу композиту при температурах, що перевищують 300–500 °C. Найчастіше використовують легкі метали, такі як алюміній, магній та, у деяких випадках, титан. Металеві матриці забезпечують не тільки підвищену жароміцність і стійкість до термодеформацій, але й кращу ізотропію властивостей та ерозійну стійкість порівняно з полімерними аналогами. Важливими вимогами до цих матриць є їх низька густина, висока стійкість до окислення і довготривала стабільність властивостей під навантаженням.

Керамічні матриці знаходять застосування в умовах надвисоких температур (понад 1000 °C) і агресивних середовищ, де потрібна виняткова стійкість до термічних і механічних впливів. Завдяки своїм унікальним властивостям, таким як висока термостійкість, низька теплопровідність і стійкість до хімічної корозії, керамічні матриці широко використовуються в авіакосмічній галузі, зокрема для компонентів, що піддаються екстремальним умовам. Основні вимоги до керамічних матриць включають високу твердість, жароміцність і стійкість до розтріскування [1].

Основним типом армуючих матеріалів для композитів є вуглецеві волокна, завдяки їх унікальним властивостям, таким як висока міцність, жорсткість і мала густина. Вуглецеві волокна діляться на кілька різновидів залежно від методу виробництва, структури та властивостей, що визначають їх застосування в різних сферах.

Високомодульні вуглецеві волокна (HM - High Modulus): Цей тип волокон характеризується дуже високим модулем пружності, що робить їх надзвичайно жорсткими. Вони використовуються у випадках, коли потрібна максимальна жорсткість матеріалу, наприклад у конструкціях космічних апаратів і супутників. Високомодульні волокна мають меншу міцність у порівнянні з іншими типами

вуглецевих волокон, але забезпечують найвищу стійкість до деформацій під навантаженням.

Високоміцні вуглецеві волокна (HT - High Tensile): Ці волокна мають дуже високу міцність на розрив, що робить їх ідеальними для застосувань, де основною вимогою є здатність витримувати значні механічні навантаження. Вони широко використовуються в авіабудуванні, автомобілебудуванні та спортивному обладнанні, де потрібно поєднання легкості й міцності.

Низькомодульні або стандартні вуглецеві волокна (LM - Low Modulus): Вуглецеві волокна з меншим модулем пружності та відносно нижчими характеристиками міцності. Цей тип волокон часто застосовується для виготовлення деталей, де важливі гнучкість і ударна стійкість, наприклад у спортивному інвентарі та захисних матеріалах.

Високотемпературні вуглецеві волокна: Спеціалізовані волокна, розроблені для роботи при дуже високих температурах. Вони зберігають свої механічні властивості навіть при температурах понад 2000 °C, що робить їх незамінними для використання в аерокосмічній галузі, зокрема в компонентах, що піддаються впливу екстремальних термічних умов.

Ультрависокоміцні вуглецеві волокна (UHT - Ultra High Tensile): Ці волокна поєднують надзвичайно високу міцність і жорсткість, що дозволяє використовувати їх у найвідповідальніших конструкціях. Вони знаходять застосування в критичних компонентах літальних апаратів, де потрібна максимальна надійність і довговічність.

1.3 Корозія вуглецевих композитів

Корозія вуглецевих композитів, хоча і є менш поширеним та обговорюваним явищем порівняно з корозією металів, відіграє важливу роль в їхньому експлуатаційному ресурсі. Вуглецеві композити, що складаються з армуючих вуглецевих волокон, інтегрованих в матрицю з полімерів або металів, характеризуються чудовими механічними властивостями, такими як висока

міцність на розтяг та жорсткість, проте вони також піддаються корозії під впливом агресивних середовищ, температурних коливань та механічних навантажень. Хімічні та фізичні властивості компонентів композитів визначають типи корозійних процесів, яким можуть піддаватися ці матеріали.

Однією з основних причин корозії вуглецевих композитів є взаємодія між вуглецевими волокнами і матричними матеріалами. Хоча самі вуглецеві волокна мають високу стійкість до корозії, матричні матеріали, що використовуються для їх з'єднання, можуть бути вразливими до різних хімічних реакцій, особливо в умовах підвищеної вологості або при впливі агресивних хімічних речовин, таких як кислоти, луги або органічні розчинники. Корозія матриці може призводити до погіршення зв'язку між волокнами і матрицею, що, в свою чергу, знижує механічні властивості композиту, зокрема його міцність на розтяг та стійкість до зношуваності. Таке явище може бути особливо критичним для композитів, які використовуються в аерокосмічній або автомобільній промисловості, де забезпечення довговічності матеріалу має вирішальне значення.

Корозія вуглецевих композитів також може виникати внаслідок електрохімічних процесів, які відбуваються при контакті вуглецевих волокон з різними матеріалами, що мають різні електрохімічні потенціали. Це створює умови для розвитку мікрогальванічної корозії, де вуглецеві волокна виступають як катод, а інші частини конструкції — як анод. В такому випадку у місцях контакту з іншими металами або сплавами виникає локальна корозія, що може призвести до ослаблення композиту, особливо в місцях з'єднання з металевими елементами конструкцій. Таке явище часто спостерігається при використанні композитних матеріалів у морських або водних середовищах, де наявність іонів, таких як хлориди, може посилювати електрохімічні реакції.

Ще одним важливим фактором, що впливає на корозійні процеси у вуглецевих композитах, є вплив температурних коливань. Оскільки вуглецеві композити мають різні теплові розширення для вуглецевих волокон і матриці, зміни температури можуть призводити до внутрішніх напружень, які, у свою чергу, сприяють появі мікротріщин та дефектів у матеріалі. Ці дефекти створюють

точки для початку корозійних процесів, особливо коли композит знаходиться в агресивному середовищі, де наявність вологи чи агресивних хімікатів посилює процеси деградації.

Вуглецеві композити можуть також зазнавати пошкоджень через вплив ультрафіолетового (УФ) випромінювання, що є особливо актуальним для композитних матеріалів, які використовуються в зовнішніх конструкціях, таких як авіаційні компоненти або будівельні матеріали. УФ-випромінювання може викликати фотохімічні реакції, які змінюють структуру матриці, роблячи її більш чутливою до подальшої корозії. Такі зміни часто супроводжуються зниженням механічних властивостей композиту, таких як міцність на вигин і стійкість до зношування, що може призвести до втрати цілісності матеріалу.

Особливу увагу варто приділяти корозії вуглецевих композитів, які використовуються в умовах високих температур. У таких ситуаціях термічні коливання значно посилюють вплив агресивних середовищ, оскільки з підвищенням температури відбувається прискорення хімічних реакцій, які сприяють більш інтенсивному окисненню матричних матеріалів і руйнуванню зв'язку з армуючими волокнами. Високотемпературні процеси можуть також викликати утворення тріщин в матриці композиту, що створює умови для подальшого проникнення корозійних агентів, таких як кислоти або волога, всередину матеріалу.

Для боротьби з корозією вуглецевих композитів використовують кілька методів, зокрема застосування захисних покриттів, які утворюють бар'єр між композитом і агресивним середовищем. Такі покриття можуть бути органічними або неорганічними і забезпечують додатковий захист від хімічних агентів і механічних пошкоджень. Крім того, розробка нових, більш стійких до корозії матричних матеріалів, таких як епоксидні або вуглецеві полімери з покращеними антикорозійними властивостями, є важливим напрямком для підвищення довговічності композитів. Важливою також є вдосконалена технологія виробництва композитів, що дозволяє зменшити кількість дефектів на етапі виготовлення і підвищити їх стійкість до корозійних процесів.

Насичення киснем, що утворюється внаслідок контактної корозії з алюмінієм, є важливим фактором, який може суттєво впливати на вуглецеві композити, особливо в умовах мікрогальванічних реакцій між вуглецевими волокнами і металевими компонентами конструкції. При контакті вуглецевих композитів з алюмінієвими сплавами виникає електрохімічна різниця потенціалів між металевою і неметалевою частинами матеріалу, що може спричинити локальну корозію алюмінію. У результаті цієї реакції відбувається виділення кисню на катодних ділянках, що може призвести до насичення киснем матричних матеріалів композиту.

Це насичення киснем створює кілька потенційно небезпечних наслідків для вуглецевих композитів. По-перше, кисень може проникати через мікротріщини та дефекти матриці, що виникають внаслідок механічних навантажень чи впливу температурних коливань. Насичення киснем у цих зонах може спричинити подальшу деградацію органічної матриці, особливо в умовах високої вологості або при впливі ультрафіолетового випромінювання. Окиснення органічних компонентів матриці, таких як полімери чи смоли, знижує її механічну міцність і зменшує здатність до ефективної взаємодії з вуглецевими волокнами. Це може привести до ослаблення зв'язку між волокнами та матрицею, що є критичним для забезпечення високих механічних властивостей композиту, зокрема міцності на розтяг та втомної стійкості.

По-друге, насичення киснем може сприяти утворенню оксидних шарів на поверхні вуглецевих волокон. Оксидні плівки, що утворюються на вуглецевих волокнах, змінюють їх електрохімічні характеристики, що може викликати додаткову корозію на межі з'єднання між волокнами і матрицею. В результаті таких реакцій змінюються механічні властивості композиту, а також знижується стійкість до циклічних навантажень та зношування. Ці зміни можуть бути особливо небезпечними для композитних матеріалів, які працюють в умовах високих механічних і термічних навантажень.

Також кисень, що утворюється внаслідок корозії алюмінію, може проникати в контактні зони між вуглецевими волокнами та іншими металевими

елементами конструкцій, викликаючи додаткову електрохімічну активність. Це підвищує ризик розвитку гальванічної корозії, де вуглецеві волокна виступають як аноди, а металеві компоненти (наприклад, алюмінієві сплави) — як катоди. Окислювальні процеси на межах контактів можуть викликати локальні пошкодження і сприяти утворенню мікротріщин, що ще більше погіршує механічні властивості композиту та його довговічність.

Насичення киснем, зокрема на поверхні алюмінієвих сплавів і вуглецевих композитів, також може призвести до змін в їх термодинамічних характеристиках, зокрема до підвищення реакційної здатності матеріалів при взаємодії з іншими агресивними хімічними середовищами. У разі тривалого впливу кисню на композитні матеріали, це може викликати комплексні хімічні та фізичні зміни, що посилюють процеси корозії, створюючи умови для руйнування конструкцій на молекулярному рівні [3, 4].

У зв'язку з цими факторами, важливою частиною технології виготовлення та експлуатації вуглецевих композитів є розробка методів захисту від контактної корозії. Це включає в себе використання спеціальних бар'єрних покриттів на поверхні металевих елементів, що перешкоджають прямому контакту між вуглецевими волокнами і металами, а також використання модифікованих матричних матеріалів, які є більш стійкими до окиснення.

1.4 Гальванічні датчики для оцінки корозійних процесів

Гальванічна корозія є одним із найпоширеніших типів руйнування металевих конструкцій і матеріалів, що виникає внаслідок взаємодії різнорідних металів у провідному середовищі. Її моніторинг є важливим аспектом забезпечення довговічності й надійності технологічного обладнання, конструкцій у будівництві, транспорті та енергетиці. Для дослідження цього явища застосовуються гальванічні датчики, які дозволяють здійснювати вимірювання електрохімічних параметрів, таких як гальванічний струм і швидкість корозії. У даному розділі розглянуто принципи роботи таких датчиків, їх конструктивні

особливості, методи підготовки до випробувань і використання для оцінки корозійної стійкості матеріалів та ефективності захисних покриттів.

Гальванічні датчики є пристроями, які складаються з двох електродів, розташованих у провідному середовищі. Ці електроди виготовляються з матеріалів, які утворюють гальванічну пару з різною електрохімічною активністю. Контактуючи через середовище, вони генерують струм, величина якого залежить від різниці потенціалів між електродами, агресивності середовища та геометричних параметрів датчика. Основною функцією гальванічних датчиків є вимірювання цього струму, який потім можна використовувати для оцінки швидкості корозії та прогнозування довговічності матеріалів.

Однією з ключових особливостей гальванічних датчиків є їх конструктивна варіативність. Залежно від мети дослідження електроди можуть виготовлятися з матеріалів, що використовуються в реальних умовах, наприклад, зі сплавів для трубопроводів, конструкційної сталі, алюмінієвих чи титанових сплавів. Також часто застосовують стандартні матеріали для порівняння агресивності різних середовищ. Відстань між електродами зазвичай не перевищує 300 мкм, що дозволяє мінімізувати крайові ефекти та забезпечити стабільність розподілу струму.

Важливим аспектом є геометрія електродів і співвідношення їх площ. Ці параметри впливають не лише на величину гальванічного струму, але й на його просторовий розподіл. Наприклад, електроди зі співвідношенням довжини до ширини 10:1 забезпечують більш рівномірний контакт із середовищем і мінімізацію впливу країв. Така конфігурація є оптимальною для зменшення викривлення результатів. Електроди можуть бути виготовлені у вигляді плоских пластин, трубок або інших форм залежно від специфіки застосування.

Методи вимірювання гальванічного струму поділяються на дві основні категорії. Перший метод базується на використанні амперметра нульового опору, який компенсує різницю потенціалів між електродами до нуля. У цьому випадку величина струму, що забезпечує компенсацію, є гальванічним струмом. Другий метод передбачає використання прецизійного резистора. Гальванічний струм

розраховується за формулою через закон Ома для ділянки кола. Для обох методів необхідно дотримуватись умов, за яких електроди будуть з'єднані через відповідний вимірювальний пристрій у моменти між вимірюваннями. Це дозволяє уникнути накопичення небажаних ефектів на електродах.

Гальванічні датчики широко застосовуються для оцінки ефективності захисних покриттів. Це особливо важливо для матеріалів, що працюють у суворих умовах, таких як агресивні середовища хімічної промисловості чи морська вода. Для таких випробувань датчики встановлюються врівень із поверхнею покриття, забезпечуючи однорідність контакту. Під час експлуатації покриття може утворювати дефекти, такі як пори, тріщини чи подряпини. Відгук датчика дозволяє оцінити не лише загальний стан покриття, але й визначити вплив окремих локальних дефектів.

Швидкість корозії, що вимірюється за допомогою гальванічного струму, може бути перетворена у швидкість втрати маси чи товщини металу. Цей процес ґрунтується на законі Фарадея, який встановлює залежність між кількістю перенесених електронів і масою кородованого металу. Для рівномірної корозії швидкість втрати матеріалу виражається в г/м^2/рік, тоді як для локальних процесів, таких як пітинг, необхідні додаткові розрахунки.

Перед початком випробувань гальванічні датчики повинні бути ретельно підготовлені. Очищення поверхонь електродів від забруднень є обов’язковим етапом. Для цього використовують хімічні методи, які забезпечують видалення органічних і неорганічних речовин без пошкодження поверхні. У випадку, коли датчики застосовуються для дослідження покриттів, їх поверхня додатково обробляється для забезпечення максимальної адгезії покриття. Металеві вироби, наприклад, з поверхнею, обробленою фрезою, можуть потребувати більш агресивного процесу очищення. З огляду на ці умови матеріалу та інші унікальні вимоги до очищення і попередньої обробки, для використання електрохімічних датчиків можуть знадобитися деякі модифікації процесу.

Особливу увагу слід приділяти перевірці характеристик датчиків перед їх використанням. Це включає візуальний огляд на наявність дефектів, перевірку

ізоляції електродів і визначення робочого діапазону. Такі випробування зазвичай проводяться в умовах, що імітують експлуатаційне середовище. Наприклад, датчики занурюють у розчини солей із відомим складом і вимірюють їх відгук у трьох зонах: низький, середній і високий рівні агресивності [6].

1.5 Розчини для дослідження корозії алюмінію, рекомендовані стандартами

Для вимірювання електрохімічної корозії алюмінію зазвичай використовують стандартні розчини, які імітують природні або експлуатаційні умови, в яких може відбуватися корозія. Одним із найпоширеніших є розчин хлориду натрію (NaCl) з концентрацією 3% масової частки, що приблизно відповідає умовам морської води. Цей розчин часто застосовується для оцінки поведінки алюмінієвих сплавів у морському середовищі або в умовах впливу соляного туману, що характерні для прибережних регіонів чи транспортування.

Для вивчення впливу лужного середовища на алюміній використовують розчини гідроксиду натрію (NaOH) із концентрацією в межах від 0,01 М до 0,1 М. Лужні розчини дозволяють змоделювати умови, у яких алюміній контактує з мийними засобами, лугами або іншими хімічними речовинами у промислових умовах.

Аналогічно, розчини хлоридної кислоти (HCl) застосовуються для вивчення поведінки алюмінію в кислому середовищі. Концентрації таких розчинів зазвичай варіюються від 0,1 М до 1,0 М, що дозволяє моделювати умови, в яких алюміній піддається впливу кислотних опадів або агресивних середовищ, характерних для промислових зон.

Нейтральні середовища зазвичай моделюються за допомогою розчинів сульфату натрію (Na_2SO_4) з концентрацією 0,1 М. Цей розчин використовується для оцінки корозійної стійкості алюмінію в умовах, які імітують вплив нейтральних або слабо кислих середовищ, зокрема промислових аерозолів або опадів.

Для більш складного аналізу, що вимагає стабільного контрольованого середовища, використовують буферні розчини, наприклад, розчин Борна-Бабо. Цей розчин, який складається з борної кислоти, її солей і натрію хлориду, має нейтральний pH (7,4) і забезпечує сталі умови для оцінки базових характеристик алюмінію.

Додатково у дослідженнях корозії алюмінію часто застосовують синтетичну морську воду, склад якої стандартизований міжнародними організаціями, такими як ISO та ASTM. Вона містить натрій, магній, хлориди та сульфати у концентраціях, характерних для природної морської води. Такий розчин забезпечує точну імітацію природних умов для випробувань на корозійну стійкість.

Для відтворення атмосферних умов, наприклад, впливу дощів, використовують розчини, що містять суміш сульфату натрію (0,05 M) і хлориду натрію (0,01 M). Вони дозволяють змоделювати атмосферну корозію алюмінієвих сплавів під впливом опадів, які можуть містити розчинені сульфати і хлориди.

Вибір розчину залежить від специфіки дослідження, а також від умов, у яких експлуатується матеріал. Усі розчини готуються з використанням дистильованої або деіонізованої води та хімічно чистих реагентів, щоб уникнути сторонніх впливів на результати дослідження. Температура розчинів зазвичай підтримується на рівні 25°C, якщо інше не передбачено методикою випробувань.

1.6 Методи дослідження корозії вуглецевих матеріалів та композитів

Дослідження корозійної стійкості вуглецевих матеріалів, таких як полімери, армовані вуглецевим волокном (CFRP), є важливим завданням, особливо для застосувань у галузі авіабудування та машинобудування. Стандарт ISO/CD 21746 визначає процедури випробувань на гальванічну корозію для металевих конструкцій та вуглецевих композитів у середовищі сольового туману. Основна мета таких досліджень — оцінка стійкості матеріалів до корозії у

складних умовах експлуатації, запобігання деградації, яка може впливати на безпеку та довговічність конструкцій.

Розчини для випробувань

Для випробувань на корозію використовуються спеціально підготовлені розчини, які імітують агресивні середовища. Основні характеристики цих розчинів включають:

Склад сольового розчину: натрій хлориду (50 г/л ± 5 г/л), що забезпечує необхідну концентрацію іонів хлору. Розчин має бути очищеним від домішок (зокрема, міді, нікелю та йодиду натрію), які можуть впливати на точність результатів.

Регулювання pH: рівень pH коригується до 6,5–7,2 для тестів у нейтральному середовищі (NSS), до 3,1–3,3 для тестів із застосуванням оцтової кислоти (AASS) і до 3,0 для тестів із прискоренням міді (CASS). Для корекції використовують соляну кислоту або гідроксид натрію аналітичної чистоти.

Спеціальні розчини для прискорених випробувань: додається купрум (II) хлорид для моделювання ще більш агресивних умов, що дозволяє вивчати поведінку матеріалів у критичних середовищах.

Випробування виконуються в камерах сольового туману, які створюють контрольовані умови експозиції матеріалів. Основні параметри:

Температура розчину в башті насичення має бути в межах 45–52 °C для нейтральних і сольових розчинів; 61–69 °C для розчинів з оцтовою кислотою та прискоренням міді. Зразки розміщують у випробувальних шафах таким чином, щоб забезпечити рівномірний вплив корозійного середовища. Для аналізу результатів використовуються такі показники як втрати маси, візуальний огляд та катодні й анодні поляризаційні тести для визначення кінетики корозійних процесів.

Прилади та допоміжне обладнання

Розпилювачі: забезпечують рівномірний розподіл сольового туману. Матеріали розпилювачів повинні бути хімічно інертними для запобігання додатковому впливу на результати випробувань.

Пристрої збору розчину: воронки з інертного матеріалу використовуються для перевірки концентрації й однорідності сольового туману в зоні розташування зразків.

Електроди: у тестах застосовуються платинові або скловуглецеві електроди для точного вимірювання електрохімічних характеристик зразків[6].

1.7 Огляд наукових статей з дослідження контактної гальванічної корозії алюмінієвих сплавів та композитних матеріалів

Гальванічна корозія виникає у результаті різниці електрохімічних потенціалів між алюмінієвим сплавом і вуглецевими волокнами. У вологих умовах, зокрема за наявності електроліту (наприклад, соляного розчину або кислотного дощу), іони з’являються на межі контакту, що створює електрохімічний осередок. У цьому осередку анодом виступає алюмінієвий сплав, який інтенсивно окислюється, а вуглецеві волокна слугують катодом, забезпечуючи відновлення розчиненого кисню. Основним шляхом зменшення швидкості цього процесу є ізоляція матеріалів або використання захисних бар'єрів.

Серед сучасних методів захисту композитів від корозії виділяється технологія нанесення діазонієвих покриттів. У роботі, яка була розглянута, демонструється спонтанне та електрохімічне осадження діазонієвих шарів на поверхню відкритих вуглецевих волокон у композитах. Метод спонтанного осадження має кілька важливих переваг:

- Формування ковалентно зв’язаних хімічно стабільних шарів;
- Простота та швидкість процесу, що дозволяє інтегрувати його у виробничі процеси;
- Зменшення швидкості гальванічної корозії та ефективна ізоляція алюмінієвих сплавів від контакту з волокнами.

У дослідженні використовувалися різні методи для оцінки ефективності діазонієвих покриттів. При електрохімічних випробуваннях використовували

триелектродну комірку, де вимірювали потенціал відкритого ланцюга, анодні і катодні поляризаційні криві. Також оцінювали кінетику реакцій відновлення кисню. Також зразки піддавалися впливу розчину 5% NaCl при температурі 35 °C протягом 14 днів у камері сольового туману. Після видалення продуктів корозії з поверхні оцінювали втрату маси та утворення корозійних пошкоджень.

Для дослідження структури і властивостей покриттів використовували спектроскопію та вольтамперометричний аналіз. Результати випробувань показали, що спонтанно осаджені діазонієві шари значно знижують швидкість відновлення розчиненого кисню та утворення корозійних продуктів.

Діазонієві шари знижують катодний струм відновлення кисню на 99% порівняно з немодифікованими зразками. У дослідженні було підтверджено, що товщина і щільність шару залежать від тривалості обробки: при 24-годинному зануренні утворюється більш однорідний і ефективний бар'єрний шар.

У випробуваннях сольовим туманом втрати маси алюмінієвих сплавів, з'єднаних із композитами, зменшилися у 16 разів після нанесення діазонієвих покриттів. Також на поверхні композиту відсутні ознаки розшарування або деградації після 14 днів впливу агресивного середовища.

У порівнянні з іншими методами такими як електрохімічна модифікація, спонтанне осадження має переваги в меншій кількості дефектів у шарі, вищій корозійній стійкості та в простоті виконання, що дозволяє застосовувати метод у серійному виробництві без значного впливу на тривалість технологічного процесу.

Результати досліджень вказують на те, що спонтанне осадження діазонієвих покриттів має високий потенціал для використання у промислових умовах. Цей метод може бути інтегрований у виробництво авіаційних конструкцій для захисту контактних зон між алюмінієвими сплавами та вуглеволоконними композитами. Завдяки простоті і низькій вартості технології, вона може використовуватися для масового виробництва, мінімізуючи витрати на ремонт і технічне обслуговування.

Ключовою перевагою є зниження ризиків гальванічної корозії, що дозволяє збільшити довговічність матеріалів. Це особливо важливо для структур літаків, які

працюють у складних атмосферних умовах, включаючи підвищену вологість і вплив морських аерозолів.

У контексті існуючих методів захисту, таких як фарби, лаки, електрохімічні покриття чи полімерні бар'єри, діазонієві покриття демонструють такі переваги:

- Більш щільний та однорідний шар. Спонтанне осадження формує покриття, яке ефективно блокує доступ електроліту до поверхні матеріалів.
- Значне зниження швидкості корозії. Експерименти показують, що модифікація поверхні зменшує втрати маси алюмінієвих сплавів у десятки разів.
- Екологічність. Ця технологія не потребує використання важких металів або токсичних речовин, що знижує вплив на навколишнє середовище.

В результаті отримуємо, що спонтанне нанесення шарів діазонію на поверхню вуглекомпозитного матеріалу значно покращує його корозійну стійкість при контакті з алюмінієвими сплавами. Для зниження вірогідності корозії внаслідок дефектів покриття на композиті, пропонується використовувати захисні гальванічні покриття на поверхні деталей з алюмінієвих сплавів, наприклад анодне нарощування оксидної плівки з подальшим запакуванням відкритих пор органічними барвниками, таким чином вдасться ще більше знизити електропровідність в точці або площині контакту, тим самим знизити вірогідність та швидкість корозії [1].

2. МЕТОДИКА ПІДГОТОВКА МЕТАЛЕВИХ ТА КОМПОЗИТНИХ ЗРАЗКІВ. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ КОРОЗІЇ МЕТОДАМИ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ОПОРУ ТА ГРАВІМЕТРІЇ

2.1 Матеріали і реактиви

Для проведення корозійних досліджень були використані алюмінієві сплави, які застосовують в авіабудуванні: АД1, Д16 та композитний матеріалМ26Т/50%/АССР19352, зразки якого були люб'язно надані відділом полімерів та композитів АТ «Антонов» для проведення випробувань на контактну корозію.

Склад сплавів

Таблиця 2.1 Хімічний склад матеріалу АД-1, %

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Домішки
до 0,3	до 0,3	До 0,025	До 0,15	Min 99,3	До 0,05	До 0,05	До 0,1	решта, кожна 0,05;

Густина складає 2,71 г/см^3.

Таблиця 2.2 Хімічний склад матеріалу Д16, %

Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Домішки	-
до 0.5	до 0.5	0.3 - 0.9	до 0.1	до 0.15	90.9 - 94.7	3.8 - 4.9	1.2 - 1.8	до 0.25	решта, кожна 0.05; всього 0.15	Ti+Zr < 0.2

Густина складає 2,79 г/см^3.

Електроди, виготовлені з прутків сплавів Д16 і АД1 з розмірами робочої поверхні: довжиною 3,97 см та діаметром 0,89 та 0,97 см відповідно.

Зразки, вирізані з пластин анодованого сплаву Д16 товщиною 1,3 мм, обробленого відповідно до технологічного регламенту АТ «Антонов» оксидуванням (див. п. 2.3).

Склади розчинів для корозійних випробувань алюмінієвих сплавів та загальні вимоги та умови згідно Міждержавного стандарту 9.913-90 Алюміній, магній та їх сплави. Unified system of corrosion and ageing protection. Aluminium, magnesium and their alloys. Methods of accelerated corrosion tests, та ISO 9223—2017 Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Classification, determination and estimation.За даними стандартами, оцінка корозії алюмінію може мати похибку в діапазоні -33%...+50%.

Зразки композитної панеліМ26Т/50%/ACCP19352.

Панель являла собою багатошаровий ламінат (поліакрилнітрильного PANвуглецевого волокна), виготовлений з 8 шарів препрега на основі епоксидного зв'язуючогоМ26 та високоміцних вуглецевих волокон 3К. Використовувалось саржеве переплетення 2х2зі схемою викладки (+45˚, 0˚, -45˚, 0˚, 0˚, -45˚, 0˚, +45˚)

2.2 Попередня обробка композитних електродів з вуглепластику

Попередню обробку композитних електродів з вуглепластику проводили згідно настанов [8].

Для електрохімічних вимірювань поверхню, що буде контактувати з алюмінієм спочатку шліфували протягом двох хвилин на шліфувальному папері з оксиду алюмінію зернистістю Р800, однієї хвилини на шліфувальному папері з зернистістю Р1500 та протягом хвилини на шліфувальному папері з зернистістю Р2000 змочених дистильованою водою. Після цього проводили 10-хвилинну ультразвукову очистку (40 кГц) в дистильованій воді. Для зразків з вуглепластику, що використовувалися для випробувань на контактну корозію, використовували конфігурацію з'єднання внахлест з алюмінієвим сплавом.

2.3 Обробка зразків з алюмінієвих сплавів

Для електрохімічних вимірювань методом поляризаційного опору зразки, виготовлені з прутків діаметром 0,89 та 0,95 см відповідних сплавів АД1 та Д16 без захисного покриття були оброблені абразивним папером з підвищенням зернистості від Р800 до Р1500, після чого вони були знежирені за допомогою віденського вапна та активовані в 1М розчині соляної кислоти.

Оксидну плівку на листовому сплаві Д16, який використовували для дослідження захисних властивостей отримували анодуванням при густині струму 1 А/дм^2 протягом 40-60 хв за температури 15-23 ^{o}С. Розчин для анодування складу: сульфатна кислота H_2SO_4 180 – 200 г/л. Після нарощування плівки проводили процес її ущільнення в гарячій воді за температури 90 - 95 ^{o}С протягом 25–30 хв, при pH 4,5–6,5, який коригується додаванням у воду сульфатної кислоти, після чого проводили промивку та сушку.

Перед корозійними випробуваннями зразків листового сплаву Д16 з оксидною плівкою підготовку поверхні проводили шляхом знежирення віденським вапном та активацією в 1М розчині соляної кислоти тривалістю 10 с.

Для гравіметричного дослідження на контактну корозію шляхом з’єднання зразків «внахлест» використовували анодовані зразки середніми розмірами 2,25×2 см, площею 4-5,62 см^2, які нарізали з листового анодованого сплаву товщиною 1,3 мм. Безпосередньо перед дослідженням їх обробляли шляхом знежирення віденським вапном та подальшим знежиренням органічним розчинником - ацетоном для забезпечення чистоти поверхні, яка контактуватиме з вуглеволоконним композитом. Для забезпечення контакту зразки щільно з’єднували кабельними хомутами 30245138 ІМТ 46403.

2.4 Вимірювання швидкості корозії методом поляризаційного опору

Вимірювання проводили за допомогою індикатора поляризаційного опору P5126 шляхом періодичної реєстрації показників в Ом у двох досліджуваних розчинах, які рекомендовані для корозійних випробувань стандартами на корозію алюмінієвих сплавів: [8,9] ANSI/NACE Standard TM0416-2016 Item No. 21405 та ISO/CD 21746 standard procedures of galvanic corrosion tests for CFRP-metal assemblies). Для моделювання звичайних умов кородування використовувався 3% розчин хлориду натрію (NaCl), для умов підвищеної агресивності в розчин додавали 0,1% пероксиду водню (H_2O_2).

Збільшення швидкості корозії відбувається за рахунок спонтанного розпаду молекул перекису водню з вивільненням кисню. Окрім цього, пероксид водню з'єднується з хлоридом натрію, іони хлориду окислюють його, виділяючи кисень і хлорид натрію за реакцією:

$$2H_2O_2 + 2NaCl \rightarrow 2NaCl + O_2 + 2H_2O.$$

Результати дослідження електрохімічним методом поляризаційного опору наводили у вигляді графічних залежностей $Rp_{пит} = f$ (τ, хвилини). Отримані дані обробляли в середовищі MS Excel шляхом перерахунку Rp в питомий поляризаційний опір та перерахунку на швидкість корозії в мм/рік з використанням коефіцієнту перерахунку поляризаційного опору на швидкість корозії К.

Цей коефіцієнт враховує електрохімічні параметри корозійного процесу, фізико-хімічні показники металу, геометричні розміри електрода і безрозмірні коефіцієнти:

$$K = \frac{A \cdot 8760 \cdot 10 \cdot 2 \cdot K_e}{\rho \cdot n \cdot F \cdot S}, \qquad (2.1)$$

де A – атомна маса металу;

n – кількість електронів, в елементарному акті;

F – число Фарадея (26,8 А·год);

S – площа одного електрода;

ρ – густина металу (г/см^3);

8760 – кількість годин у календарному році;

10 – перевідний розмірний коефіцієнт (см/мм);

2 – число електродів в електрохімічній комірці;

K_e – електрохімічний коефіцієнт (В), рівний при корозії сталі з кисневою деполяризацією співвідношенню $b_a/2,3$, де b_a – тафелевський нахил анодної поляризаційної кривої ($b_к \rightarrow \infty$, тафелевський нахил катодної поляризаційної кривої в умовах корозії з кисневою деполяризацією).

Для циліндричних електродів АД1 та Д16;

A_{Al} = 26,98 г;

Густина ρ АД1 = 2,71 г/см^3; ρ Д16 = 2,78 г/см^3

Кількість електронів в реакції анодного розчинення алюмінію n = 3 , тоді K_e = 0,039 В, оскільки коефіцієнт Тафеля ba = $\frac{2,3\,RT}{\alpha nF}$ = b^0/n при α = 0,5.

*$K_{АД1}$ = 28,98 · 8760 · 2 · 10 · 0,039/(2,71 · 3 · 26,8 · 11,647) = 78 Ом·мм/рік

*$K_{Д16}$ = 28,98 · 8760 · 2 · 10 · 0,039/(2,78 · 3 · 26,8 · 12,746) = 69,5 Ом·мм/рік.

Для «прапорців» анодованих Д16

Робоча площа 1 електроду = 2 см^2

*$K_{Д16}$ = 28,98 · 8760 · 2 · 10 · 0,039/(2,78 · 3 · 26,8 · 2) = 443 Ом·мм/рік

Такий коефіцієнт перерахунку можна використовувати і у випадках, коли застосовується двохелектродна схема вимірювання, але електроди можуть бути іншої площі і форми (наприклад, прямокутної).Основна вимога – вони мають бути ідентичними за формою, складом, площею поверхні і попередньою обробкою поверхні.

2.5 Вимірювання швидкості контактної корозії гравіметричним методом

Перед вимірюванням швидкості корозії гравіметричним методом зразки алюмінієвих сплавів та вуглеволоконного композиту ретельно зачищували промивали проточною водою, після чого проходили очистку від залишків металу та абразиву в ультразвуковій ваннiUltrasonicCleancerSetWVC-A01 протягом 10 хв

за частоти коливань 40 кГц. Після чого зразки ретельно висушували протягом години і зважували на аналітичних терезах RADWAGAS 220.R2з точністю до 0,0001 г.

До поверхні алюмінієвого зразка притискали зразок з композитного матеріалу зачищеною стороною за допомогою діелектричного хомута. З'єднані «внахлест» зразки занурювали в окремі хімічні стакани з 3% NaCl ємністю 100 мл. Корозійні випробування проводили за кімнатної температури 20 ± 2 °С в умовах природної аерації, паралельно проводили виміри на двох парах зразків. Випробування проводили з тривалістю 24, 96, 120 та 168 годин для кожної пари зразків. Після випробувань зразки виймали зі стаканів, після чого ретельно промивали проточною водою. Продукти корозії видаляли за допомогою м'якої гумки, щоб не зняти непошкоджений метал. Після очищення зразки ще раз ретельно промивали в водопровідній та дистильованій воді, просушували протягом години та повторно зважували на аналітичних вагах з точністю0.00001г.

Швидкість корозії визначали за формулою:

$$K = \frac{\Delta m \cdot 8760}{\rho \cdot S \cdot T},$$

де К – швидкість корозії, Δm – зміна маси зразка, г; 8760 – кількість годин в одному році, ρ – густина металу г/см^3; S – площа поверхні металу, см^2; T – тривалість випробувань, години.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Дослідження швидкості корозії методом поляризаційного опору на зразках у формі прутків без захисного покриття.

Відомо, що корозійні парціальні реакції на алюмінії та його сплавах в середовищі з нейтральним pH відповідають реакціям:

- анодного розчинення Al:Al ↔ Al^{3+} + (E^0 = -1, 67 В);
- катодного відновлення деполяризатора – розчиненого кисню, який відновлюється на граничному дифузійному струмі і перебіг якої буде суттєво залежати від pH середовища згідно діаграм Пурбе:

в нейтральному $O_2 + 2H_2O + 4e \leftrightarrow 4OH^-$ (pH=7) (E°= +0,81 В)

у лужному $O_2 + 2H_2O + 4e \leftrightarrow 4OH^-$ (pH=14) (E°= +0,41 В)

в кислому $O_2 + 4H^+ + 4e \leftrightarrow 2H_2O$ (pH=0) (E°= +1,23 В).

Методом поляризаційного опору проведено дослідження зміни миттєвих показників Rpна зразках у формі прутків алюмінієвих сплавів АД1 та Д16 площею робочої поверхні 11,647 $см^2$ та 12,746 $см^2$ відповідно в середовищах розчинів, які регламентуються стандартами: 3% NaCl, 3% NaCl + 0,1% H_2O_2 та в 3% розчині морської солі з додаванням 0,1% H_2O_2, для імітування корозійних умов в атмосфері вологого морського клімату, що відповідало б експлуатації деталей в літаках, які внаслідок перельотів можуть перебувати в різних кліматичних зонах з різною агресивністю середовища.

На рисунках 3.1 та 3.2 наведено залежність питомого поляризаційного опору сплаву АД1 від тривалості прискорених випробувань в середовищі 3% NaCl для трьох паралельних дослідів.Як видно з графічних залежностей, середні показники питомого Rp за час випробувань знаходяться в межах 20 – 60 $кОм·см^2$ для обох марок алюмінієвих сплавів в розчині 3% NaCl.

Додавання пероксиду водню, який збільшує концентрацію розчиненого кисню в середовищі відповідно до реакції $2H_2O_2 + 2NaCl \rightarrow 2NaCl + O_2 + 2H_2O$

для прискорення корозійного процесу суттєво змінює динаміку процесу (рис.3.3, 3.4) суттєво знижуючи початкові значення питомого Rp. Загальний хід залежностей також змінюється – показники монотонно зростають з часом, досягаючи для АД1 рівня 15 кОм·см^{2}за 1,5 години випробувань, в той час, як для Дюралевого сплаву води набагато нижчі – 0,9 кОм·см^2.

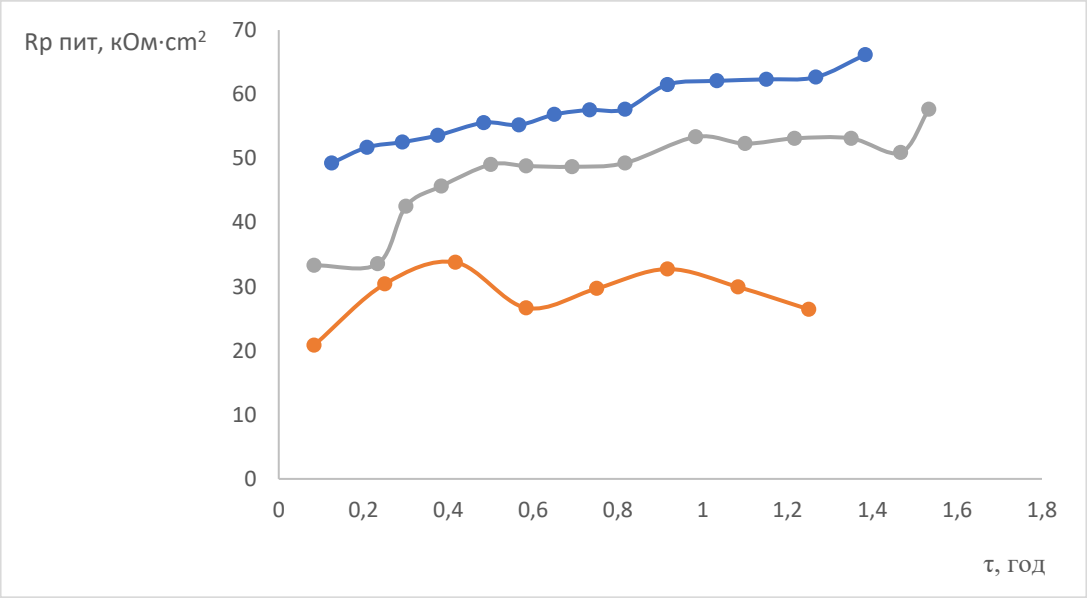


Рисунок 3.1 – Показники питомого поляризаційного опору АД1 в 3% NaCl.

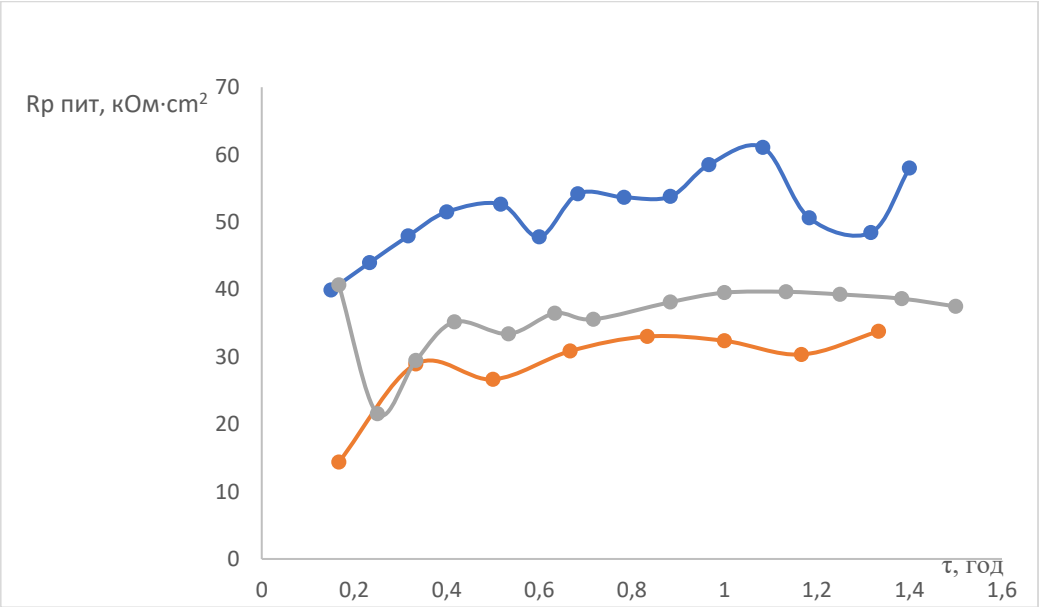


Рисунок 3.2 – Показники питомого поляризаційного опору сплаву Д16 в 3% NaCl.

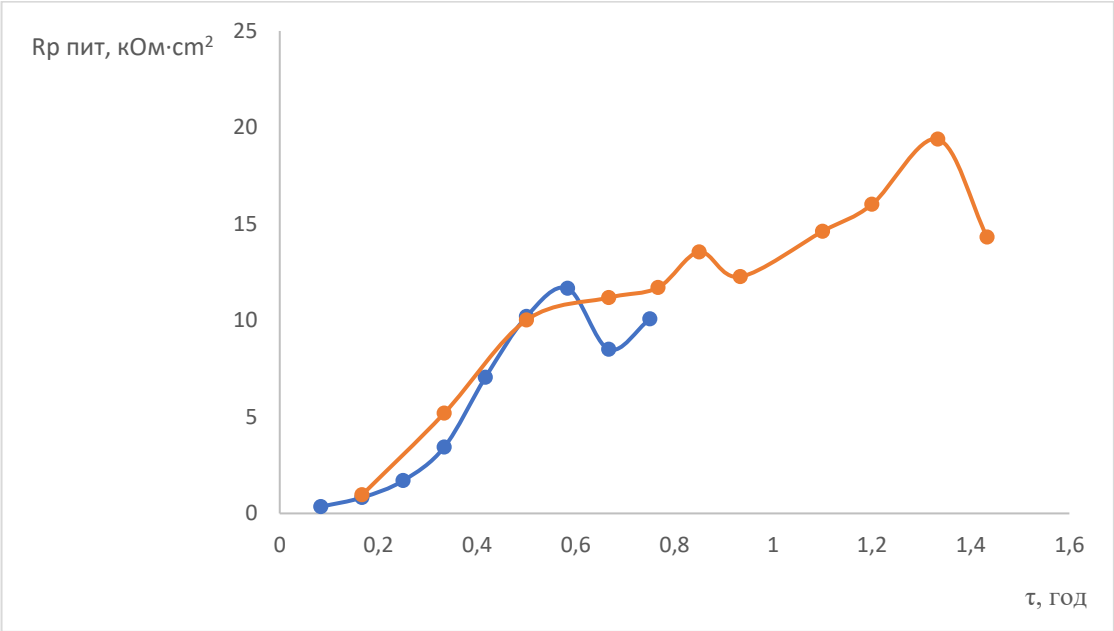


Рисунок 3.3 – Показники питомого поляризаційного опору АД1 в 3% NaCl + 0,1% H_2O_2.

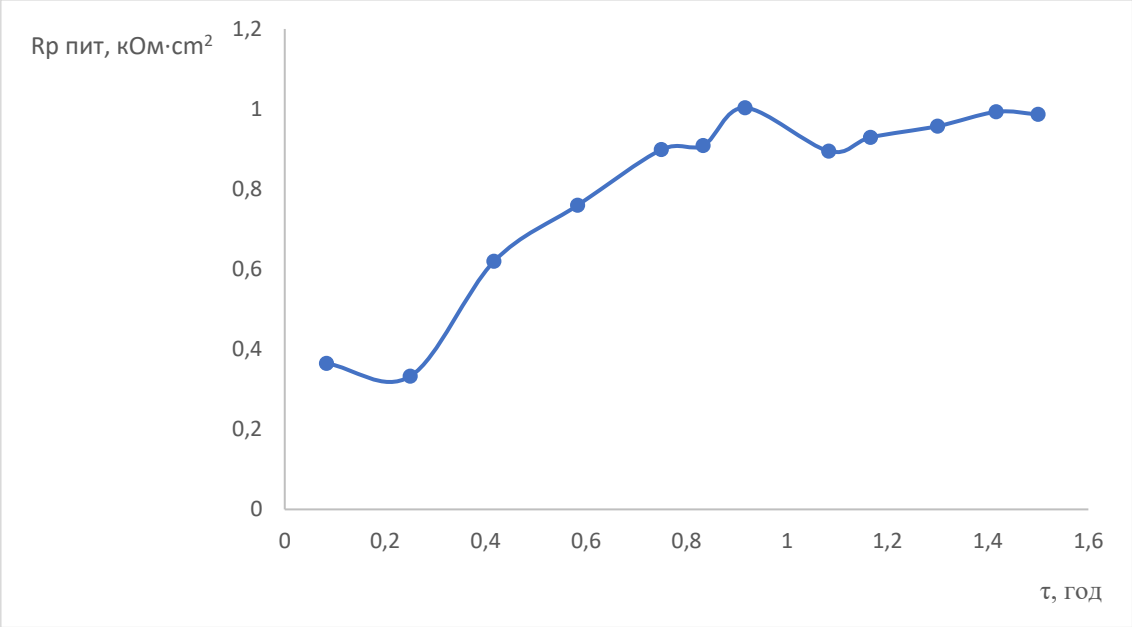


Рисунок 3.4 – Показники питомого поляризаційного опору Д16 в 3% NaCl + 0,1% H_2O_2

Внаслідок утворення додаткової кількості кисню, порівняно з його рівноважною концентрацією в розчині за відповідних атмосферного тиску та температури, значно збільшується агресивність середовища. З графіків на рисунку

3.3 та рисунку 3.4 видно, що корозійна стійкість сплаву Д16 за рахунок утворення більшої кількості мікрокатодних ділянок через наявність у сплаві катодних домішок міді, що викликає значне зниження початкових значень Rp. Зростання питомих Rp з часом пов'язано з утворенням поверхневих осередків нерозчинних гідроксидів алюмінію (рис. 3,5), що блокують частину поверхні і, тим самим, зменшують доступ кисню, знижуючи загальну корозію.

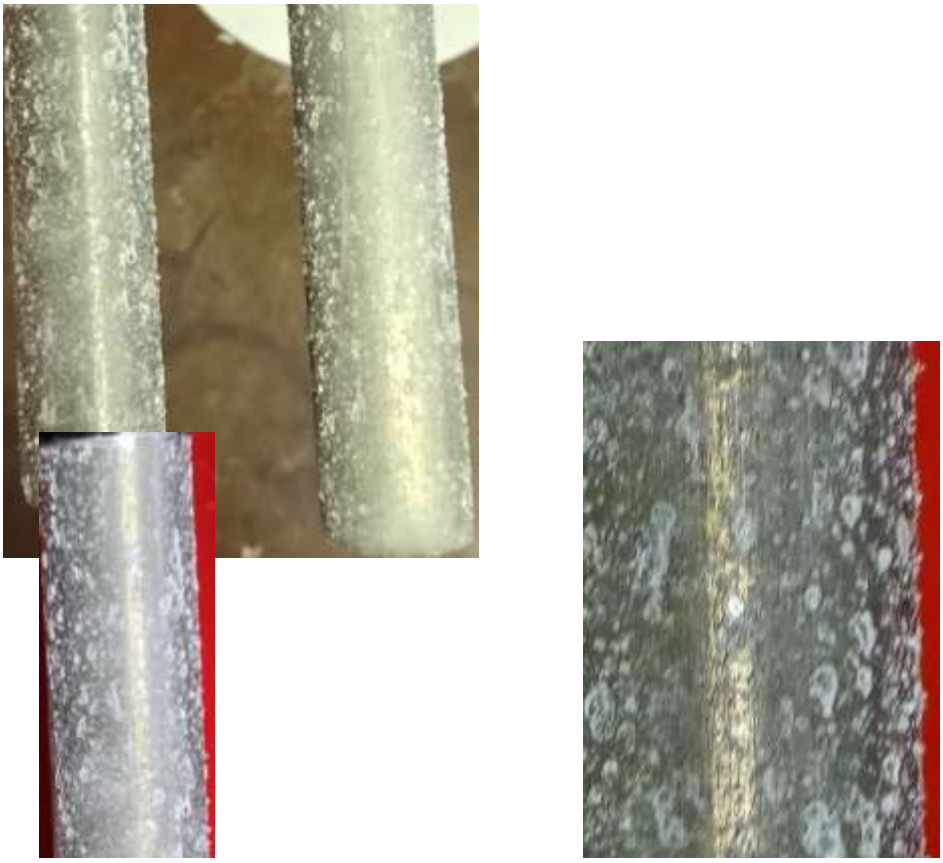


Рисунок 3.5 – Стан поверхні зразку Д16 після зняття кривих поляризаційного опору. Помітні кристали гідроксиду алюмінію на поверхні.

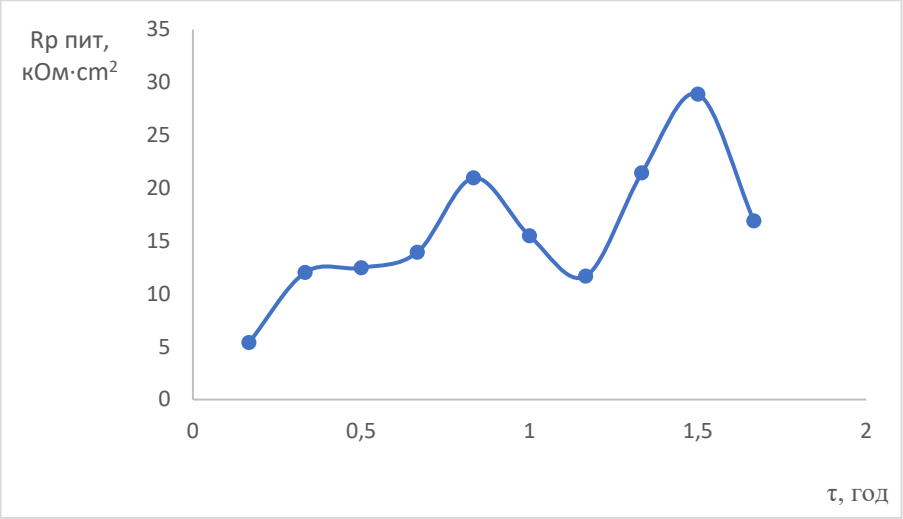


Рисунок 3.6 – Показники питомого поляризаційного опору АД1 в 3% розчині морської солі + 0,1% H_2O_2

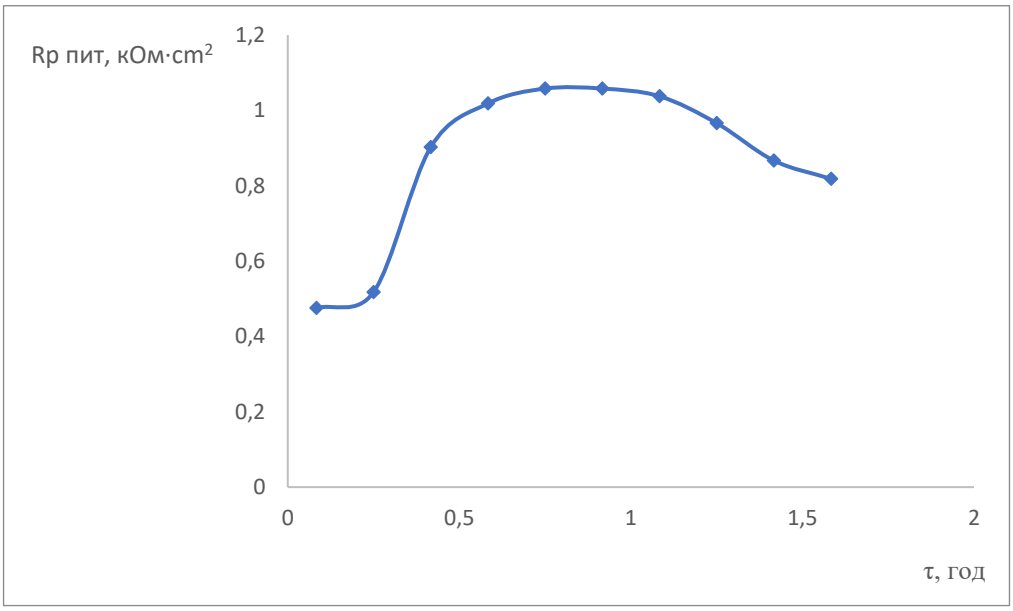
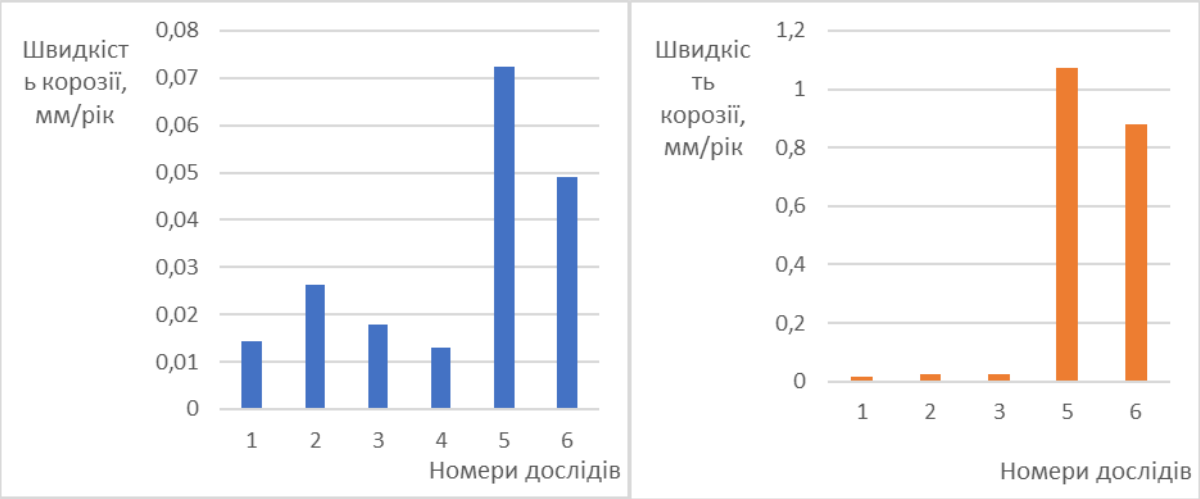


Рисунок 3.7 – показники питомого поляризаційного опору Д16 в 3% розчині морської солі + 0,1% H_2O_2

Результати, отримані в 3% розчині морської солі з додаванням 0,1% H_2O_2є подібними до результатів розчину 3% NaClз додаванням пероксиду водню за характером зміни показників. З рисунку 3.3 та рисунку 3.6 видно, що на АД1 утворюється пасивуюча оксидна плівка, а дюраль Д16 (рис. 3.4; 3.7) дуже погано протистоїть корозії і не підходить для використання в таких середовищах без додаткового захисту від корозії.

Наглядно показано різницю корозійної стійкості сплавів АД1 та Д16в різних середовищах на діаграмах (рис 3.8; 3.9). Швидкість корозії сплавів розраховували, використовуючи коефіцієнт перерахунку поляризаційного опору на швидкість корозії, який наведено в розділі 2.4.

Таким чином, корозійна стійкість, визначена лабораторними прискореними випробуваннями сплаву АД1 майже в 10 разів вища, ніж протикорозійна стійкість дюралі Д16 у розчинах, які рекомендовані стандартизованими методиками.



а б

Рисунок 3.8– Діаграма показників швидкості корозії сплавів АД-1 (а) та Д16 (б) в розчинах (1, 2, 3 - 3% NaCl, 4, 5 - 3% NaCl + 0,1% H_2O_2, 6 - 3% розчині морської солі + 0,1% H_2O_2)

3.2 Дослідження швидкості корозії методом поляризаційного опору на зразках з анодованого листового матеріалу

Для дослідження використовувались зразки з анодованого сплаву Д16 (як описано в розділі 2.3) в формі прапорцівпрямокутної форми з робочою площею поверхні, 2 см^2, вся поверхня, крім робочої, була заізольована лаком. Дослідження швидкості корозії методом поляризаційного опору проводили в середовищах розчинів 3% NaCl та 3% NaCl + 0,1% H_2O_2 для порівняння результатів, отриманих при дослідження властивостей металевого матеріалу - прутків без додаткової

обробки поверхні. На рисунках 3.9 та 3.10 наведено графіки залежності питомого поляризаційного опору від тривалості експозиції.

Як видно з результатів, отриманих на зразках з листового анодованого сплаву Д16 у розчині 3% NaCl (рис.3.9) питомий поляризаційний опір майже у у рази нижчий, від результатів, отриманих на електродах, виготовлених з прутків (рис. 3.2). Причому, з часом показники Rpмонотонно знижуються за 1,5 години випробувань. Такий же характер мають залежності і в більш агресивному розчині 3% NaCl + 0,1% H_2O_2 (рис. 3.10)

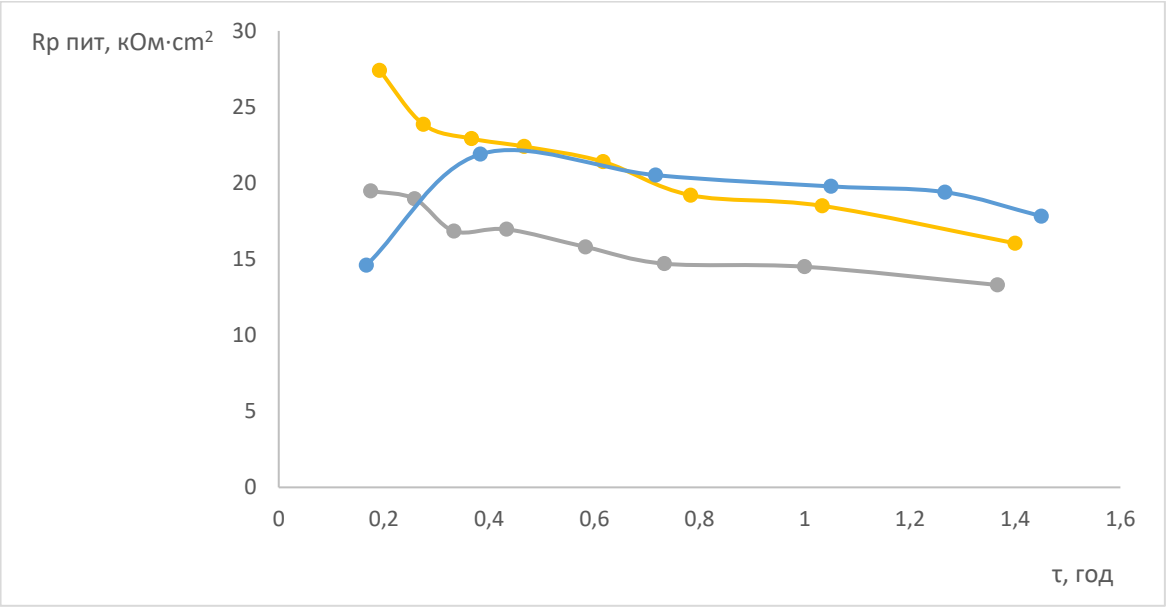


Рисунок 3.9 – Показники питомого поляризаційного опору анодованих зразківсплаву Д16 в 3% NaCl.

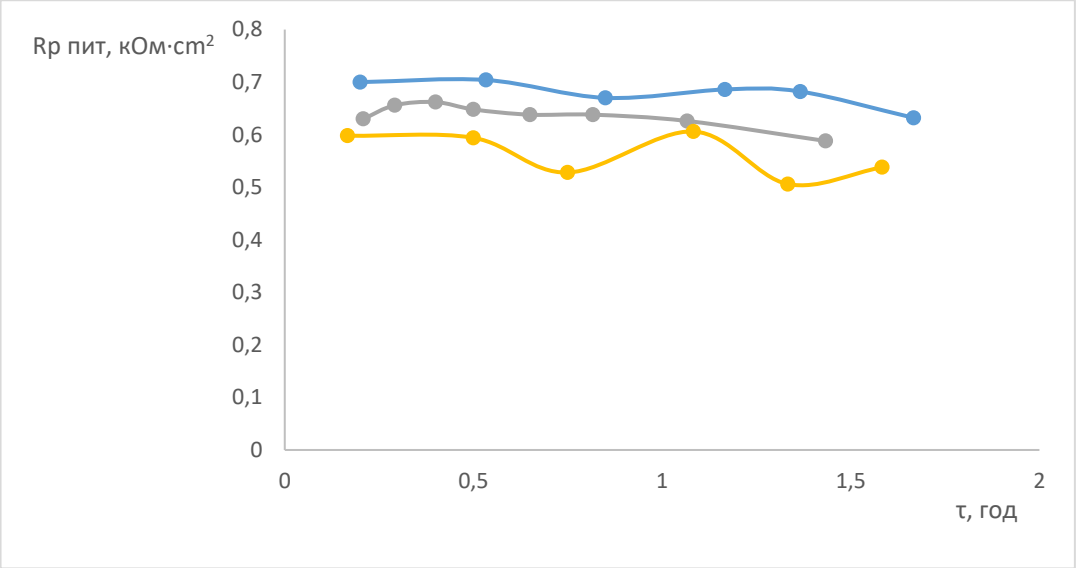


Рисунок 3.10 – Показники питомого поляризаційного опору анодованого зразку Д16 в 3% NaCl + 0,1% H_2O_2

З наведених графіків видно, що анодовані зразки в розчині, який відповідає умовам експлуатації в середовищі з підвищеною агресивністю, показують в ≈ 30 разів нижчі значення питомого поляризаційного опору, що в даному разі свідчить про недостатні показники захисних властивостей анодованого покриття.Однак, слід зазначити, що відтворення показників Rp в даному разі набагато краща, ніж на електродах з пруткового матеріалу, що може бути пов’язане з підготовкою поверхні зразків перед випробуваннями.

Візуальний огляд поверхні зразків до та після випробувань протягом 1,5 годин показав, що поверхня зразків також суттєво змінилась (рис. 3. 11).

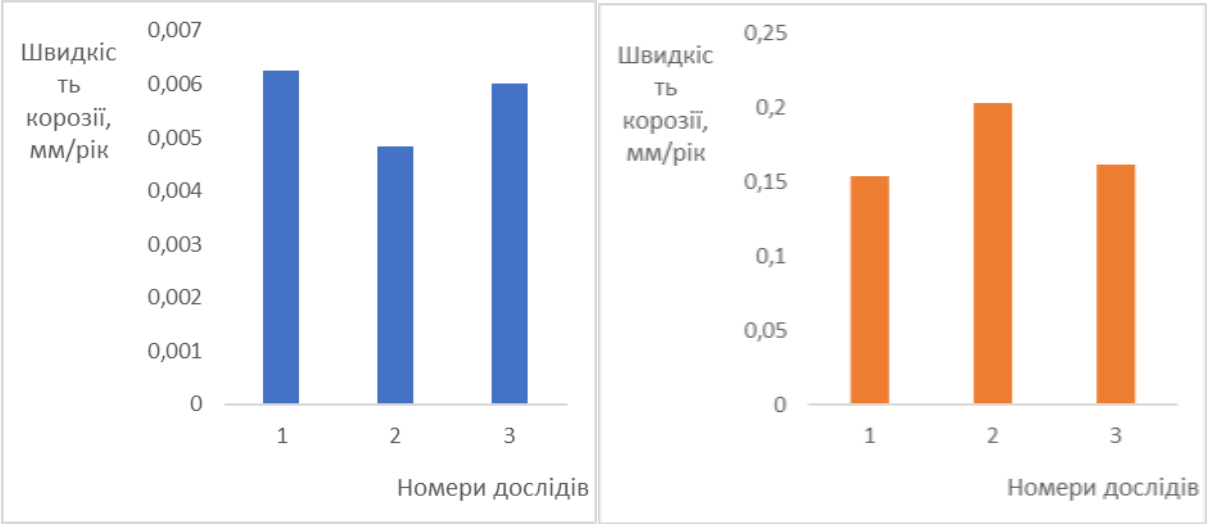
а б в

Рисунок 3.11 – Фото стану поверхні зразків анодованого сплаву Д16 після проведення досліджень: а – в розчині 3% NaCl, б – в розчині 3% NaCl + 0,1% H_2O_2, в – в розчині 3% NaCl + 0,1% H_2O_2, збільшений масштаб.

Візуально помітно, що на лівому зразку утворився ледь помітний пітинг (рис. 3.11 б), проте оксидна плівка не була достатньо пошкоджена, щоб допустити сильне падіння поляризаційного опору і, відповідно, сильне корозійне ушкодження поверхні. На зразку, який був занурений в розчин з додаванням перекису водню (рис. 3.11 в) помітно дуже сильну пітингову корозію, а при збільшенні можна побачити, що оксидна плівка в місцях пітингу майже повністю зруйнована, що призводить до сильного зниження поляризаційного опору алюмінію і як наслідок великої корозійної втрати маси металу, що може призвести

до погіршення необхідних механічних властивостей деталей з оксидованого сплаву.

Порівняльні діаграми швидкості корозії анодованого сплаву Д16, розрахованої за методикою, описаною в розділі 2.4, в розчинах3% NaCl та 3% NaCl + 0,1% H_2O_2 наведені на рисунку 3.12.



а б

Рисунок 3.12– Порівняння показників швидкості корозії анодованих зразків Д16 в різних розчинах: а- 3% NaCl, б - 3% NaCl + 0,1% H_2O_2.

Як видно з результатів лабораторних прискорених випробувань,швидкість корозії анодованого сплаву Д16 в розчині 3% NaCl майже у 2 рази вища, ніж швидкість корозії електродів, виготовлених з прутків. І, відповідно, майже у 30 разів підвищується в розчині з пероксидом водню.

3.3 Дослідження контактної корозії сплаву Д16 з вуглеволоконним композитом гравіметричним методом

Для дослідження використовувались зразки анодованого Д16 та вуглекомпозиту М26Т/50%/АССР19352, з відсотком перекриття поверхонь ≈ 90%. Для експерименту було виготовлено вісім пар зразків, вирізаних з анодованого

листового сплаву, та вуглеволоконного композиту, які мали приблизно однаковий розмір і площу. Після попередньої обробки зразки з'єднували «внахлест»діелектричним матеріалом, як описано в розділі 2.5. З'єднані зразки одночасно занурили хімічні стакани ємністю 100 мл з досліджуваним розчин 3% хлориду натрію. Випробування проходили за кімнатної температури 20 ± 2 °С в умовах природної аерації. Зразки 1,2 випробували 24 години, 3,4 – 96 годин, 5,6 – 120 годин, 7,8 – 169 годин. Після випробувань зразки виймали попарно, щоб зменшити ймовірність похибки внаслідок недостатнього притискання компонентів гальванічної пари один до одного. Потім промивали у водопровідній та дистильованій воді і просушували. Результати зважування та масові показники гальванічної контактної корозії представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1- Результати вимірювань зміни маси зразків та розрахунку швидкості корозії.

Номер зразка	m до занурення, г	m після занурення, г	Δm, г	S, см^2	Час корозії, години	Швидкість корозії, мм/рік
1	0,4654	0,4648	0,0006	5,13	24	0,0154
2	0,5817	0,5812	0,0005	4,97	24	0,0132
3	0,5637	0,5624	0,0013	4,71	96	0,0091
4	0,5056	0,5039	0,0017	5,62	96	0,0099
5	0,4309	0,4290	0,0019	4,77	120	0,0105
6	0,4181	0,4151	0,0030	4,53	120	0,0174
7	0,5927	0,5883	0,0044	4,91	168	0,0168
8	0,5080	0,5065	0,0015	4,00	168	0,0070

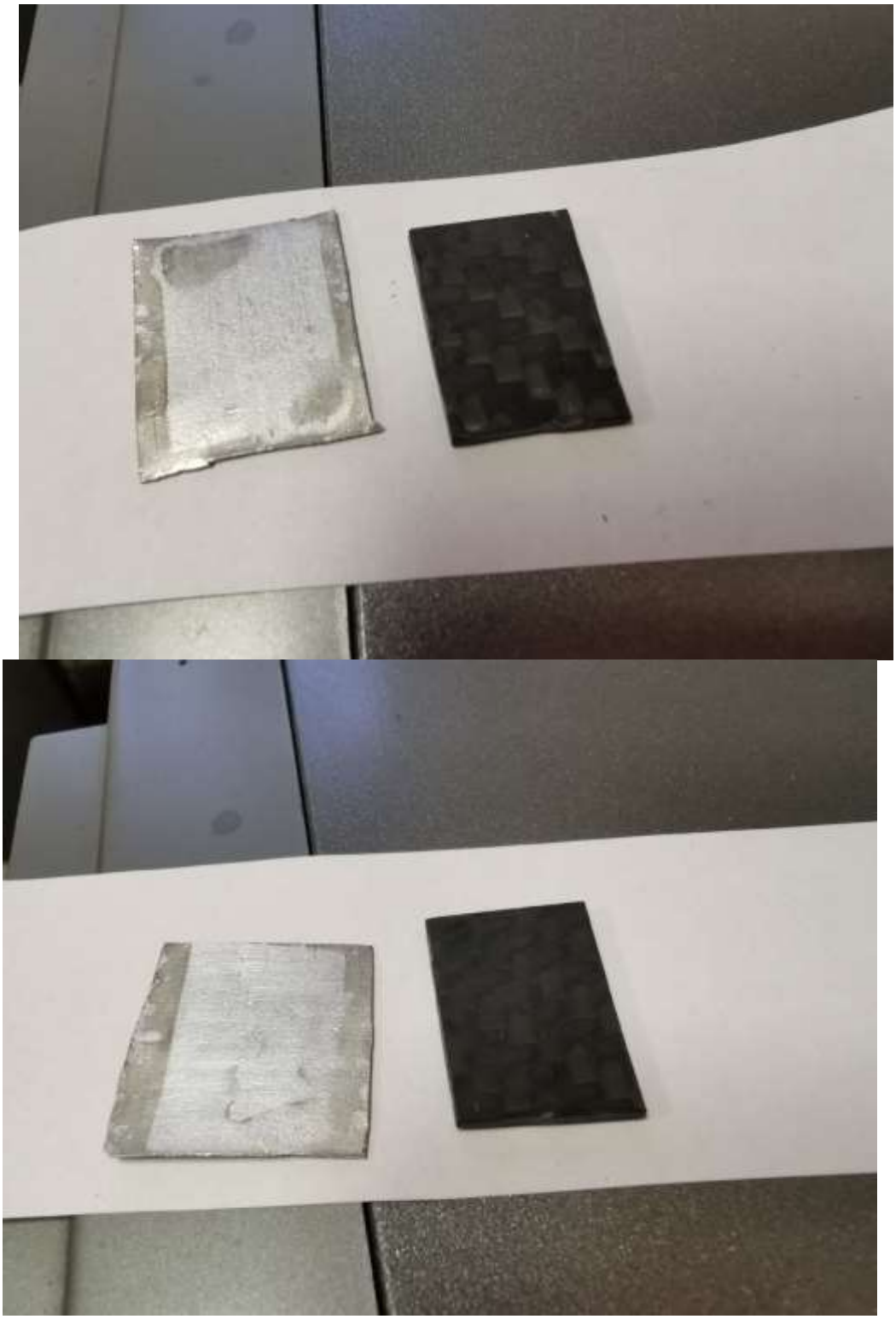


Рисунок 3.13 – вигляд контактної робочої поверхні зразків Д16 та композиту після 24 годин випробування

На рисунку 3.13 добре видно, що в місці контакту алюмінієвих і вуглепластикових зразків верхній шар оксидованого алюмінію розчинився,

оскільки в даній гальванічній парі вуглеволокно є більш електропозитивним матеріалом, тому металевий зразок виступає анодом і розчиняється з утворенням білого осаду гідроксиду алюмінію за реакцією:

$Al + 3H_2O = Al(OH)_3 \downarrow + H^+$ (гідрат) ($E^0 = -1,47 - 0,059$ pH)

Утворений гелеподібний осад гідроксиду збирався на поверхні зразків в місці контакту та на дні стаканів.

На вуглеволокні може відбуватись реакція стадійного відновлення кисню, механізм якої був запропонований в роботах [29, 30]:

$O_2 + e \rightarrow O_2^-$ (ads)(I)

O_2^- (ads)$+H_2 \rightarrow HO_2$ (ads)$+OH^-$(II)

З наступною реакцією диспропорціонування:

$2O_2^-$ (ads)$+H_2O \rightarrow HO_2^- + O_2 + OH^-$(III)

Або електрохімічним відновленням :

HO_2 (ads)$+e \rightarrow HO_2^-$(IV).

Причому молекули кисню накопичуються в композитному вуглеволокні, сприяючи його поступовій деградації.

Аналіз результатів таблиці3.1 та графік зміни маси зразків внаслідок гальванічної корозії (рис.3.14) показує, що корозійні втрати маси закономірно зростають з часом. Однак, з часом також збільшуються розбіжності в результатах паралельних дослідів. Зокрема, розбіжності можуть бути викликані експериментальними неточностями. Наприклад, зразок під номером 8, вірогідно, мав недостатнє зусилля для притискання і, відповідно, слабкий контакт, внаслідок чого утворилась менша щільність контакту, порівняно зі зразком номер 7, а також була ймовірність накопичення осаду гідроксиду алюмінію між робочими поверхнями за більшу тривалість експозиції, що призвело до гальмування проходження електрохімічної реакції між анодованим сплавом і композитом.

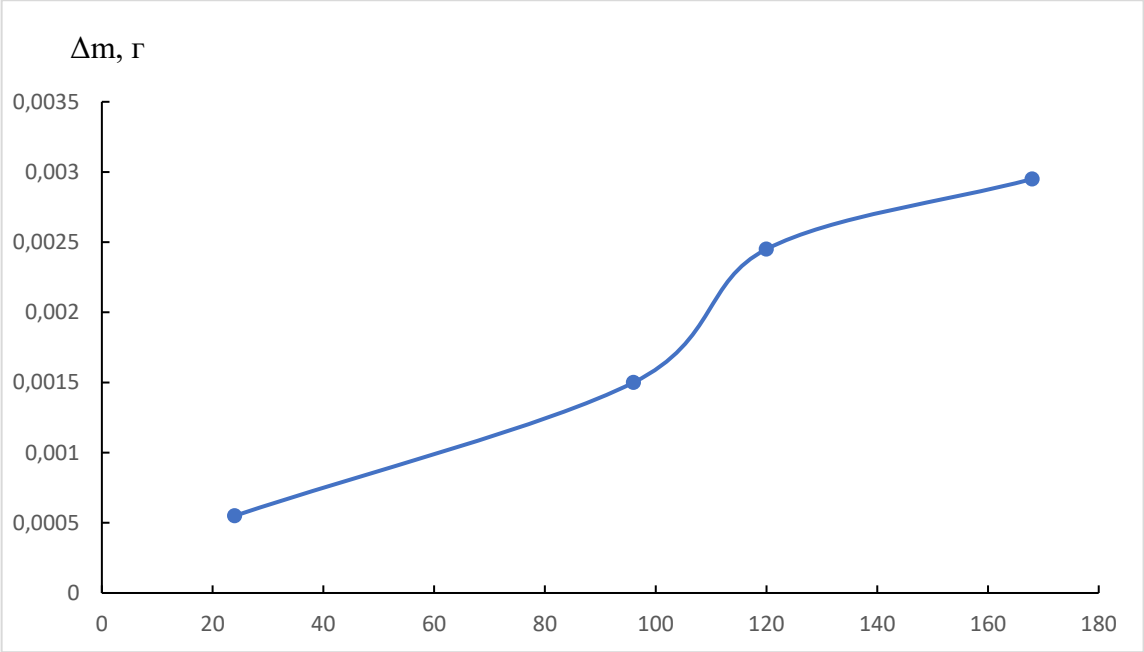


Рисунок 3.14 – Графік змінисередньої втрати маси зразків дюралі Д16 відносно часу витримки в корозійному середовищі.

З наведених в таблиці 3.1 результатів по швидкості гальванічної корозії можна зробити висновок, що в початковий період анодована поверхня швидко кородує, проте, з часом анодована плівка під дією контактнох різниці потенціалів розчиняється і кількість дефектів плівки збільшується, що призводить до пришвидшення корозії дюралі. З цього можна зробити висновок, що фактор наявності ущільненої оксидної плівки на алюмінії не є достатнім для гарантування відсутності контактної корозії металу, особливо за можливості розтріскування вуглеволоконного композиту. Отже, такі з'єднання потребують нанесення герметику в область контакту, або нанесення діелектричних покриттів на поверхню композитів як додаткового захисту.

- Таким чином, експресним методом поляризаційного опору проведено корозійні дослідження алюмінієвих сплавів АД1та анодованого і неанодованого Д16 у стандартних середовищах 3% NaCl, 3% NaCl + 0,1% H_2O_2 і встановлено,

що наявність пероксиду водню суттєво зменшує показники питомого поляризаційного опору і, відповідно, підвищує швидкість корозії у десятки разів.

Методом масометрії визначено швидкість контактної гальванічної корозії між дюраллю Д16 та композитним вуглепластиком М26Т/50%/АССР19352, яка за 168 годин випробувань досягає 0,017 мм/рік. Цей показник більш як у два рази перевищує швидкість загальної корозії сплаву Д16 в середовищі 3% хлориду натрію.

4.СТАРТАППРОЄКТ(ЕКОНОМІЧНАЧАСТИНА)

4.1Резюместартап-проєкту

Вданомупроєктібізнес-ідеєюєорганізація лабораторії, що займається дослідженням атмосферної корозії алюмінієвих сплавів та гальванічної корозії алюмінієвих сплавів з композитними матеріалами.

Мета стартапу: Оскільки корозія при використанні композитних матеріалів разом з металами є досить актуальною проблемою, то для її вирішення авіа- та аерокосмічні компанії можуть збільшити корисну вагу на своїх апаратах і контролювати корозійну стійкість при використанні новітніх композитних матеріалів, тому дослідницька лабораторія може бути економічно вигідною.

Таблиця4.1 –Резюместартап-проєкту

Показник	Характеристика
1	2
Сутність ідеї	Надання послуг з дослідження корозії загалом, та спеціалізація на дослідженні корозії різних поєднань сплавів алюмінію з композиційними матеріалами
Основна ідея яку задовольнить реалізований стартап	Надання кваліфікованих послуг для обрання матеріалів, щоб задовільнити вимоги корозійної стійкості
Гранична корисність ідеї стартапу	Зниження витрат часу для вибору матеріалів при розробці нових вузлів/літальних апаратів
Бізнес-модель стартапу	Класична
Аналоги ідеї (ціна, на якому етапі	Спеціалізованих лабораторій не існує

реалізації знаходяться)	
Класифікація продукту стартапу за міжнародною класифікацією товарів	Дослідження в техніці 420040
КВЕД	Секція – М Клас – 71,20
Очікувана потужність стартапу	Мале підприємство
За масштабом виробництва	Індивідуальне виробництво
За рівнем спеціалізації	Профільні
За ресурсами, що споживаються	Працемістке , капіталомістке
За чисельністю персоналу	Мале
За географічним розташуванням	Україна
За географічним розташуванням на території України Офіс	м. Київ Вул. Вацлава Гавела 18
Органи управління при реалізації стартапу	Міжнародні
Місце ідеї у ланцюжку цінностей інноваційного процесу	Дослідження інноваційних матеріалів
Конкуренти вітчизняні (ціна, на якому етапі реалізації знаходяться, основні конкурентні переваги, фактори успіху)	Лабораторії при вищих навчальних закладах, які займаються зазвичай дослідницькою діяльністю і лише зрідка комерційною.
Конкуренти іноземні (ціна, на якому етапі реалізації знаходяться, основні конкурентні переваги, фактори успіху)	Невідомі
Ключові фактори успіху стартапу	Надання висококваліфікованої експериментальної та консультаційної допомоги з питань корозії сплавів та композитів

Продовження таблиці 4.1

Споживачі (основні на етапі впровадження, групи, орієнтовна чисельність)	Юридичні, фізичні та приватні особи
Планова кількість продукту розробки для першого етапу реалізації	Для повного дослідження необхідно 14 календарних днів
Споживачі на етапі розвитку	Фізичні особи, приватні підприємці
Споживачі на етапі зрілості	Приватна особа, Фізична особа, Юридична особа
Конкурентна ціна на продукт стартапу	Мінімальна ціна за послуги 5000 грн, вартість повного пакету 20000 грн.
Плановий рівень рентабельності при реалізації продукту	115%
Період повернення капіталовкладень в проєкт	2 роки
Джерела фінансування	Внутрішні та зовнішні
Потенційні постачальники складових компонентів розробки (виділити вітчизняних і закордонних, плановий обсяг замовлень, наявна потужність постачальника)	Biuged Instruments, Китай Kern & Sohn GmbH, Німеччина
Планове місце реалізації результату розробки (місце, планова доля реалізації продукту через це місце)	м Київ Офіс – 10% Сайт – 90%
Наявність посередників при реалізації (так, ні, орієнтовні посередники, форми оплати їх діяльності)	Реклама

Продовження таблиці 4.1

Методи просування результатів розробки на ринок	Пропаганда, реклама

4.2Аналіз зовнішнього та внутрішнього середовища стартапу

Таблиця4.2–Аналіззагрозіможливостейзовнішньогосередовища

	Загрози	Можливості
Економіка		
Податкові канікули; лояльні умови розвитку для бізнесу	Поява конкурентів, зменшення попиту внаслідок збільшення пропозицій інших підприємств	Вдосконаленнявиробництва, збільшення обсягів прибутку
Політика		
Накладення санкцій, Зміна суспільно- політичного ладу	Впливає на умови конкуренції, ускладнює взаємодію з іноземними замовниками рівень прибутку підприємства.	можливість отримати фінансування та держзамовлення у сфері авіабудування
Науково – технічний процес		
Розвиток технологій	-	Збір, зберігання інформації, інновації, які виникають в середовищі діяльності організації, і їх випровадження.

Таблиця4.3–Аналізперевагінедоліківзовнішньогооперативногосередовища

Фактор	Переваги	Недоліки
Фактори зовнішньо оперативного середовища		
Споживачі		
1.Вимоги до якості продукції	Можливість надати якомога більш точні дані	-
2.Вимоги на ціну продукції	Для зменшення ціни продукції можна надавати часткові результати дослідження замість комплексних, щоб споживач мав можливість придбати продукцію	Продукція може бути дорожчою, ніж очікують споживачі, тому що на неї затрачено багато ресурсів, щоб зробити її якісною
Конкуренти		
1.Інноваційна наповненість	Використання інноваційних технологій, для більш точних прогнозів	Більша зацікавленість в мінімальному пакеті досліджень замість повного
Постачальник		
1.Розташування	Зручне розташуванняпостачальників,щомінімізує витрати на доставку	Недоліком буде незручне розташуванняпостачальника, яке бпідвищувало витрати натранспортування і доставку

Продовження таблиці 4.3

2.Ціни	Адекватна ціна наелектроенергію	Зависокацінана електроенергію
3.Якістьсировини	Високаточність результатів досліджень. Споживачі будутьотримувати якісний товар,можливо збільшиться кількість замовлень/замовників, а отже і дохідзросте	Низька точність досліджень призведе до сильного зниження репутації та як наслідок об’єму продажів консультацій

Таблиця4.4–Аналіззацікавленихсторін

Зацікавленасторона	Вплив на їїреалізаціюпроєкту	Цікавістьїїпроєкту	Загальний коефіцієнтвпливу напроєкт
Суб’єктивнутрішньогосередовища			
Виробник	9	9	81
Постачальник	8	7	56
Споживачі	10	10	100
Посередники	6	3	18
Суб’єктизовнішньогосередовища			
Політичніструктури	3	5	15
Суб’єкт економічногосередовища	8	5	40
Власникигеографічнихоб’єктів	2	3	6

Суб’єктидемографії	2	5	10

Продовження таблиці 4.4

Суб’єктикультурногосередовища	2	3	6
Суб’єктиНТП	9	7	63

Таблиця4.5–Перевагиінедоліки внутрішньогосередовища

Переваги	Недоліки
Новіробочімісця	Витрата часунанавчанняперсоналу
Розвиток вітчизняних технологій	Недовговічнеобладнання(ремонт)

Таблиця4.6–ОцінкахарактеристикизаметодомШонфільда

Характеристика	Коефіцієнтваго мостіхарактери стик	Оцінкахарактеристик		
		Нашапродук ції	КонкурентА	КонкурентБ
Ціна	0,3	4	3	5
Якість	0,4	5	5	3
Екологічність	0,1	4	5	3
Дотрим. вимогнорм.документ .	0,2	5	3	4

Зурахуваннямкоефіцієнтувагомостіхарактеристикивизначаєтьсябальнаоцінка характеристикидлянашоїпродукціїідля конкурентів.

Таблиця4.7–Оцінкахарактеристикидлянашоїпродукціїідляконкурентів

Характеристика	Бальна оцінкахарактеристики		
	Нашапродукція	КонкурентА	КонкурентБ
Ціна	0,3 ·4 = 1,2	0,3 ·3 = 0,9	0,3 · 5 = 1,5
Якість	0,4· 5 = 2	0,4· 5 = 2	0,4· 3 = 1,2
Екологічність	0,1 ·4= 0,4	0,1 ·5= 0,5	0,1 · 3 = 0,3
Дотрим. вимог. норм.документації	0,2 ·5= 1	0,2 ·3= 0,6	0,2 ·4= 0,8

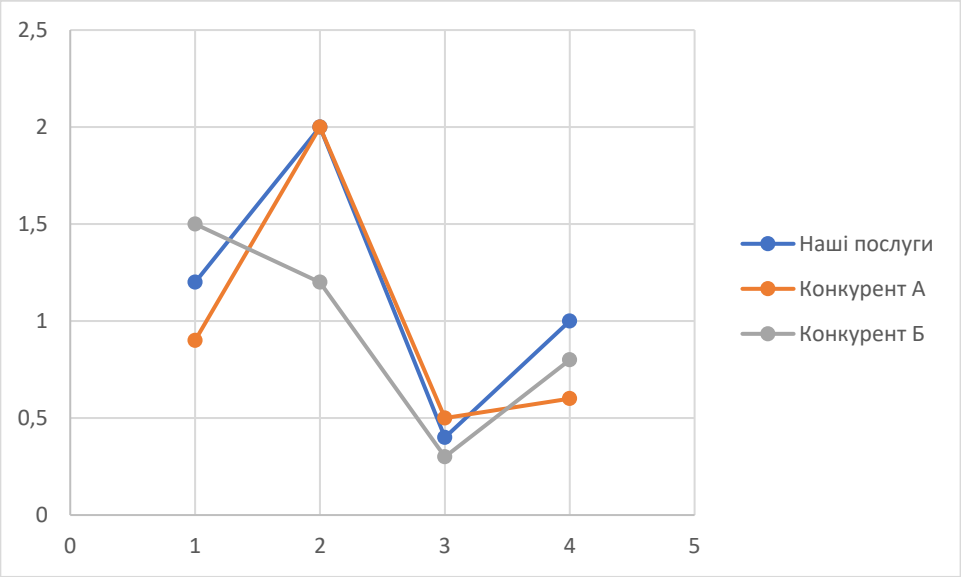


Рисунок4.1 -Порівняннянконкурентнихпереваг підприємствазконкурентами

Відповіднодорезультатів,перевагоюпідприємстваєдотриманнявимог нормативної документації. За данимпоказником продукція поза конкуренцією. За показником «якість» тільки конкурент А на нашому рівні. За показником «ціна» у нашогопідприємстватількиконкурент Б, за показником «екологічність» Конкурент А.

Такимчином,можнасказати,щонашепідприємствоповиннобутизосереджене

на утриманні показника «екологічність» та «дотримання вимогнормативноїдокументації».

Таблиця4.8–Варіантирозвиткуідеїстартапу

Варіант	Стислийопис можливогорозвитку
1. Дослідження впливу контактної корозії на алюмінієві сплави та композитні матеріали	Вузькоспеціалізоване дослідження швидкості контактної корозії на матеріали та її вплив на механічні властивості конструкцій
2.Дослідження впливу різноманітних покриттів як захисту від контактної корозії.	Дослідження властивостей захисних покриттів на конкретні матеріали, надані замовником, та консультація по вибору захисту з подальшими тестами ефективності.

Таблиця4.9–Класифікація потенційнихспоживачів

1 Юридична особа	
Критерій	Значення
Формавласності	Приватне,колективне
КВЕД	Секція–С Клас–30.30, 33,16
Запотужністю	Великі, середні, малі
Замасштабомвиробництва	Масові
Зарівнемспеціалізації	Профільні
Заресурсами,щоспоживаються	Капіталомісткі,працемісткість
Зачисельністюперсоналу	Великі, середні, малі
Засферою діяльності	Виробничі,посередницькі, страхові
Заприналежністюкапіталуіконтролю	Національні, іноземні

Загеографічнимрозташуванням	Україна, США
Завіддаленістюорганівуправління	Національні, міжнародні
Захарактеромгосподарськоїдіяльності	Промислові, страхові
Зарівнемтехнологічноїцілісності	Провідні,філії
Заформуванням статутного капіталу	Унітарні,корпоративні
Заорганізацієювиробничихпроцесів	Безперервні, періодичні
Зароботоюпротягомроку	Позасезонні
Загеографічнимрозташуваннямна території України	Не впливає на можливість співпраці
Задинамікоюрозвиткурегіону розташуванняюридичноїособи	Обмеженнявідсутні
2. Фізичнаособа	
Вік	18-65
Заплатоспроможністю	5000-15000
Засоціальнимрівнемспоживачів	Невпливає,середня,вищесередньої
Заспособомжиття(звички, традиції, стереотипи поведінки)	Соціально-стабільні
Типособистостіспоживачів	Реаліст,традиціоналіст, гедоніст
Заставленнямдотовару	Бажання покращити власну продукцію, впровадження інновацій
Засімейнимицінностями	Повнасім’я,середнятавищесередньої, етап циклу сім’ї неважливий,наслідуєтрадиції

Продовження таблиці 4.9

За співвідношенням бажанняпридбати і ціновоїмежі(співставитицифрипарами «місячнийдохід–вартістьодиниці товару»)	80-100%
За інтенсивністю споживання товару	Разове та періодичне придбання
За інформованістю	Самоосвіта, спеціальніджерела

Таблиця4.10 –Клієнтійогопотреби

Категорія клієнтів	Потреби, які він задовольняє за допомогою вашогопродукту
Приватна особа та фізична особа	Задовольняєпотребивпровадження нових матеріалів задля покращення власного продукту. Надання послуг по консультації, щодо безпечного використання аналогів матеріалів

Таблиця4.11-Запланованийобсяг реалізації досліджень

Запланований	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
	10	9	10	10	10	9	8	8	9	10	10	9

4.3 Оцінкаринковихпозиційінноваційноїрозробки

Розрахунки ціни інноваційної пропозиції на ринку

1.Розрахунок ціниза витратним методом

$$Ц = С + П$$

Ц – ціна одиниці дослідження, грн. С– собівартістьтовару.

П– величинаприбутку,якубажаєотриматипідприємствовідреалізаціїодиницітовару, грн.

Собівартістьодиниціпродукції для середнього замовлення:

$$С_{од} = 11250 \text{ грн}$$

Запланованаринковацінаоднієїодиниціпродукції:

$$Ц = 1500 + 11000 = 12500 \text{ грн}$$

$$Ц = 12500 \text{ грн}$$

2.Розрахунокціниагрегатнимметодом

$$Ц = ЦЕ_1 + ЦЕ_2 + \ldots + ЦЕ_{2\ldots1}$$

Елемент(на1дослідження)	Ціна, грн
Електроенергія 1 кВт	10
Вода 1 $м^3$	75,86
Хлорид натрію 1 кг	190
Перекис водню 100 мл	220
Сульфатна кислота 2 л	340
Дистильована вода 10 л	504
Сума	1339,86

3. Методом точки беззбитковості

Розрахуємо точку беззбитковості Х. Знайдемо собівартість Х досліджень. На проведення одного дослідження в середньому витрачається 1339,86 грн. При цьому за рік необхідно сплатити 184 220 тис. грн зарплати та 43 214 тис. грн амортизації. При цьому досліджень буде проведено на 12500*Х грн. Складемо рівняння:

$$12500 \cdot X = 1339{,}86 \cdot X + 43214 + 184220$$

$$X = 20{,}379$$

Отже, точка беззбитковості нашого підприємства – 21 дослідження.

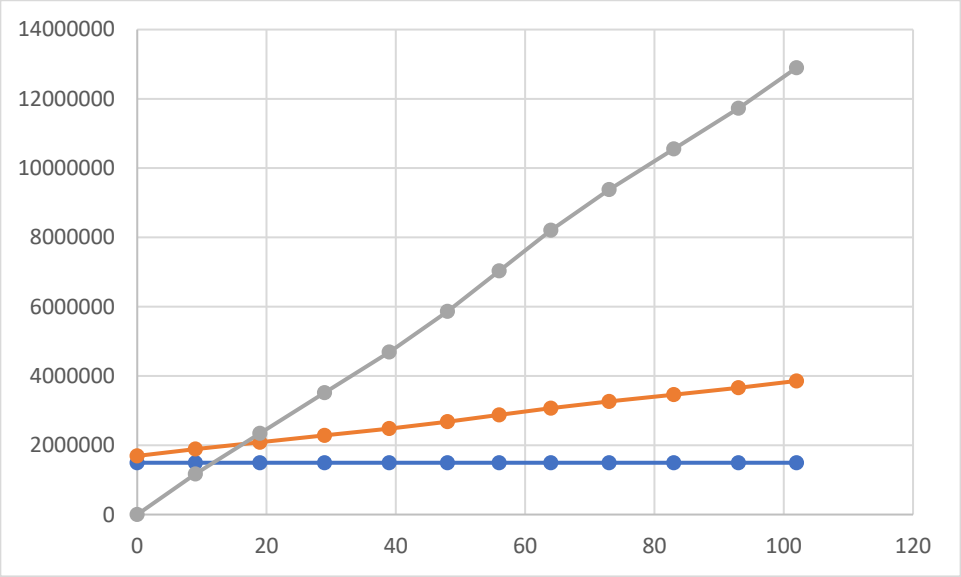


Рисунок4.2 –Графік точки беззбитковості

Таблиця4.12–Забезпеченістьпроєктуосновнимизасобами

Місце ОЗ утехнологічномупроцесі	НазваОЗ	ПовнапочаткованартістьОЗ	ПлановийперіодексплуатаціїОЗ	Джерелофінансуванняпридбання
Зберіганняреактивів	Реактиви	50 000	10років	Купівля
Купівля приміщення	Робоче приміщення	1 000 000	20років	Купівля
Забезпечення хімічним посудом	Хімічний посуд	5 000	10років	Купівля
Вимірювання поляризаційного опору	Індикатор поляризаційного опору Р5126 з електродами	10000	7 років	Купівля
Дослідження атмосферної корозії	Камера сольового туману	100 000	7 років	Купівля

Продовження таблиці 4.12

Гравіметричні дослідження	Аналітичні ваги	10 000	10 років	Купівля
Безпека	Системабезпеки тасигналізація	320 000	20років	Купівля

Таблиця4.13– Забезпеченняпроєктутрудовимиресурсами

Категорія кадрів	Назвапосади	Чисельністьза списком	Плано-вий рівеньЗП	ДжерелофінансуванняФОП
1	2	3	4	5
Спеціалісти	Майстерзміни	2	20000	З доходупідприємства
	Лаборант	4	15000	
Молодшийперсонал обслуговування	Прибиральниця	1	8000	
Керівники	Головнийтехнолог	1	25000	
	Начальник відділукадрів	1	18000	
Разом(намісяць)			151 000	
СоціальнівідрахуваннядоПенсійногофонду(22%)(на місяць)			33 220	
ФОПвиробничогоперсоналу			184 220	

Джереламифінансуванняданогостартапуможутьбути:

- Власнікошти(коштиотриманівідінших сферді яльності)
- Фінансовіінвестиції(кредитування)

Таблиця4.14–Техніко-економічніпоказникипроєкту

Показник	Одиниця виміру	Розрахунок
Річнийобсягреалізаціїідеї,технології,методики	Од.	112 досліджень/рік
Середньорічна чисельність персоналу за списком	Осіб	9
Утомучислі -основних -допоміжних - інженерно-технологічного персоналу	Осіб	Основних–6 Допоміжних – 1Інженерно-технологічногоперсоналу – 2
Середньорічнийвиробітокробітника	Од./особу	112/9=12,44
Відноснийприбуток	Грн./рік	1 400 000– 227 434= 1 172 565
Повнасобівартість -всього -наодиницюпродукції	Грн.Грн./од	Одиницяпродукції –1500 грн/м^3 Річнасобівартість–168 000грн/рік
Рентабельність	%	1 172565/227 434·100%=515%
Періодповерненнякапіталовкладень	Роки	1 495 000/1 172 565 = 1,27роки

Таблиця4.15—

Ризики,якіможутьвиникнутипідчасдіяльностіташляхиїхвирішення

Ризики	Сутьризику	Заходиусунення
Технологічнийризик	Відхід від методики при дослідженні, помилки при обробці результатів	Підвищенняквaліфікаціїп ерсоналу, посилення контролю за новими працівниками з боку майстра зміни
	Поломкаагрегатів виробництва	Швидкий ремонт абопереплaнування послідовності досліджень
	Затримка постачання реактивів	Мати достатній запас сировини, для заповнення часу на пошук нового постачальника
Економічний ризик	Зміна оподаткування. Збільшення кількості конкурентів	Вихід на міжнародний ринок
Техногенний фактор	Пожежна безпека на виробництві	Проведення первинних та планових інструктажів

Таблиця4.16–Планзаходівзуправлінняризиками

Назва ризику	Назва методу управління ризиком	Відповідальні виконавці	Період виконання/ Застосування методу	Очікувані результати від впрова-дження методів управління
Зменшення цін на послуги	Введення подарункових акцій на послуги з додаткових досліджень	Головний технолог	День	Збільшення середньої кількості пунктів в замовленні
Зменшення обсягів замовлень	Підвищення кваліфікації персоналу	Головний технолог, майстри зміни	1-2 тижні	Підвищення якості досліджень, можливість отримання напрямку для розвитку лабораторії

Анкета для клієнтів

Запитання:

1. Які ваші очікування від нашого подальшого співробітництва? Ми хочемо зрозуміти, як результати наших досліджень щодо швидкості контактної корозії між алюмінієвими сплавами та вуглеволоконними композитами можуть відповідати вашим потребам і допомогти у вирішенні конкретних завдань.

2. Чи зацікавлені ви у варіативності методів дослідження? У разі потреби можемо запропонувати додаткові технологічні рішення. Це вимагатиме додаткових ресурсів, але надасть вам ширший вибір даних і методів

аналізу.

3. Чи готові ви укласти договір на один рік чи одразу на три роки? Ми прагнемо оцінити вашу готовність до довготривалої співпраці. Якщо ви обираєте контракт на рік, нам важливо дізнатися, які аспекти потребують додаткових уточнень для підвищення вашої впевненості в нашій роботі.

4. Який обсяг результатів досліджень вам потрібен одноразово, і які дані ви плануєте отримувати протягом трьох років? Це допоможе нам зрозуміти ваші довгострокові потреби в дослідженнях впливу корозії на механічні властивості вузлів конструкцій.

5. Чи готові ви укласти контракт на співпрацю вже зараз? Нам важливо оцінити вашу готовність до укладення угоди. Якщо рішення ще не прийнято, ми готові обговорити ваші сумніви та відповісти на додаткові запитання.

6. Для успішного впровадження результатів досліджень у вашу практику ми проводимо аналіз найефективніших методів та пропонуємо оптимальні технологічні рішення для застосування отриманих даних.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації проведено дослідження корозійної стійкості алюмінієвих сплавів при контакті з вуглепластиковими композитами, що є важливим науково-практичним завданням для зменшення ризику руйнування конструкцій та підвищення їх довговічності.

Встановлено, що контактна корозія алюмінієвих сплавів суттєво залежить від складу електроліту, присутності хлоридів та інших агресивних компонентів. Основним механізмом корозійного руйнування є гальванічна корозія, що виникає через різницю електродних потенціалів між алюмінієвими сплавами і вуглецевими композитами.

Експресним методом поляризаційного опору проведено корозійні дослідження алюмінієвих сплавів: АД1 та анодованого і неанодованого Д16 у стандартних середовищах 3% NaCl, 3% NaCl + 0,1% H_2O_2 і встановлено, що наявність пероксиду водню суттєво зменшує показники питомого поляризаційного опору і, відповідно, підвищує швидкість корозії у десятки разів.

Методом масометрії визначено швидкість контактної гальванічної корозії між дюраллю Д16 та композитним вуглепластиком М26Т/50%/АССР19352, яка за 168 годин випробувань досягає 0,017 мм/рік. Цей показник більш як у два рази перевищує швидкість загальної корозії сплаву Д16 в середовищі 3% хлориду натрію.

Розроблено стартап проєкт, який розглядає бізнес-ідеєюорганізації лабораторії, що займається дослідженням атмосферної корозії алюмінієвих сплавів та гальванічної корозії алюмінієвих сплавів з композитними матеріалами. Розглянуто аналіззагрозіможливостейзовнішньогосередовища, варіантирозвиткуідеїстартапу, оцінкуринковихпозиційінноваційноїрозробки. А також ризики,якіможутьвиникнутипідчасдіяльностілабораторії ташляхиїхвирішення.

Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення антикорозійних технологій у сфері авіаційної та транспортної техніки, а також в інших галузях, де застосовуються комбіновані матеріали.

Список літератури

1. Матеріалознавство: підручник / [Дяченко С. С., Дощечкіна І. В., Мовлян А. О., Плешаков Е. І.]. – Харків : Видавництво ХНАДУ, 2007 – 440 с.
2. Калініна, Н.Є. Використання алюмінієвих сплавів в авіаційній та ракетно-космічній техніці [Текст]: навч. посіб. /Н.Є. Калініна, О.В. Бондаренко. – Д.: РВВ ДНУ, 2011. – 64 с.
3. Isuri N. Dammulla, Greg M. Swain / Inhibiting Metal Galvanic and Carbon Corrosion in AluminumAlloy-Carbon Fiber Reinforced Composite Joints by SpontaneousDeposition of Diazonium Adlayers on Exposed Carbon Fibers. (2023) J. Electrochem. Soc. 170 091503. DOI: 10.1149/1945-7111/acf889
4. B. Jiang, Q. Chen, and J. Yang, “Advances in joining technology of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite materials and aluminum alloys.” Int. J. Adv. Manuf., 110, 2631 (2020).
5. Спеціальні конструкційні матеріали. Підручник для ВНЗ / [Солнцев Ю. П., Бєліков С. Б., Волчок І. П., Шейко С. П.]. – Запоріжжя : Валпіс-Поліграф. – 2010. – 534 с\
6. ANSI/NACE Standard TM0416-2016 Item No. 21405
7. Композиційні матеріали в авіабудуванні (огляд) / С. Б. Бєліков, І. П. Волчок, О. А. Мітяєв, В. М. Плескач, В. О. Савченко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - 2017. - № 2. - С. 32-40.
8. ISO 8057:2024(en) Determination of galvanic corrosion rate for assembled forms of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) and protection-coated metal — Electrochemical tests in neutral sodium chloride solution.
9. Основные виды и причины разрушения конструктивных элементов из алюминиевых сплавов отечественных воздушных судов транспортной категории / А. С. Бычков, С. Р. Игнатович, А. Г. Моляр // Открытые

информационные и компьютерные интегрированные технологии. - 2015. - Вып. 70. - С. 136-151.

10. C. Soutis, “Fiber reinforced composites in aircraft construction.” Prog. Aerosp. Sci., 41, 143 (2005).
11. Z. Peng and X. Nie, “Galvanic corrosion property of contacts between carbon fiber cloth materials and typical metal alloys in an aggressive environment.” Surf. Coat. Technol., 215, 85 (2013)
12. L. Li and G. M. Swain, “Formation and structure of trivalent chromium process coatings on aluminum alloys 6061 and 7075.” Corrosion, 69, 1205 (2013)
13. T. Dursun and C. Soutis, “Recent developments in advanced aircraft aluminum alloys.” Mater. Des., (1980-2015), 56, 862 (2014).
14. D. D. L. Chung, Carbon Composites: Composites with Carbon Fibers, Nanofibers, and Nanotubes (Butterworth-Heinemann, Oxford) (2016).
15. B. Jiang, Q. Chen, and J. Yang, “Advances in joining technology of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite materials and aluminum alloys.” Int. J. Adv. Manuf., 110, 2631 (2020).
16. Борисенко Ю. В. Б 82 Матеріали сучасної техніки та захист від руйнування : навчальний посібник / Ю. В. Борисенко. – К. : КНУТД, 2016. – 111 с.
17. Будівельне матеріалознавство для сучасного будівництва : навч. посібник / О. В. Кондращенко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 208 с.
18. Розроблення стартап-проекту: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» та спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» / О.А. Підлісна, Ю.В. Тюленєва ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 46 с.

19. Економічна частина магістерської дисертації: розроблення стартап-проекту: [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» / О.А. Підлісна, Ю.В. Тюленєва ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 32 с.

20. Виконання магістерської дисертації [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ВО рівня «магістр» спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», ОПП «Хімічні технології неорганічних, електродних матеріалів та водоочищення» / Т.А. Донцова, О.В. Косогін, О.І. Букет, М.В. Бик, І.В. Косогіна, Г.В. Кримець; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 1,6 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 58 с.

21. Основи виробничого підприємництва: Навчальний посібник / під ред. Підлісної О.А., Янкового В.В. –К.: ІВЦ «Видавництво Політехніка», НТУУ «КПІ», 2010. –287 с.

22. Практичні завдання з навчальної дисципліни "Управління процесом розробки й освоєння виробництва нових продуктів"" для студентів спеціальності 8.03060102 "Менеджмент інноваційної діяльності" денної форми навчання [Текст] / Харк. нац. екон. ун-т ; [уклад.: Разінкова В. П.]. - Х. : Вид-во ХНЕУ, 2012. - 27 с. : табл. - Бібліогр.: с. 24-26. - 50 экз.

23. Белецкий, В. М. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение) [Текст]: справ. / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов; под общ. ред. И. Н. Фридляндера. – К.: Коминтех, 2005. – 365 с

24. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування [Електронний ресурс]: підр. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології»,спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів» / М. В. Бик, О. І. Букет, Г. С.

Васильєв – Електронні текстові дані (1 файл: 8,81 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 318 с.

25. Mandel M., Krüger L. Electrochemical corrosion studies and pitting corrosion sensitivity of a self-pierce rivet joint of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) - laminate and EN AW-6060-T6. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2012. Vol. 43, no. 4. P. 302–309. URL:https://doi.org/10.1002/mawe.201200945 (date of access: 10.11.2024).

26. Аболихина, Е. В. Коррозия самолетных конструкций из алюминиевых сплавов [Текст] / Е. В. Аболихина, А. Г. Моляр // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2003. – №6. – С. 106 – 110.

27. Goodman KE and Loos AC. Thermoplastic prepreg manufacture. J Thermoplast ComposMater 1990; 3: 34–40.

28. Fovet, Y & Pourreyron, Laurence & Gal, JY. (2000). Corrosion by galvanic coupling between carbon fiber posts and different alloys. Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials. 16. 364-73. 10.1016/S0109-5641(00)00039-7.

29. J. Xu, W. Huang, R.L. McCreery, J. Electroanal. Chem. 410. (1996) P.235.

30. K. Tammeveski, K. Konntturi, R.J. Nichols, R.J. Potter, D.J. Shiffrin. Surface redox catalysis for O_2 reduction on quinone-modifiedglassy carbon electrodes // Journal of Electroanalytical Chemistry 515 (2001) 101–112.